

**TEKNILLINEN KORKEAKOULU**

Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto

Puunjalostustekniikan laitos

Ismo Pietari

**LAMINAATTIRAKENTEEN KEHITTÄMINEN HALLITSEMALLA  
SEN KÄYRISTYMISKÄYTTÄYTYMISTÄ**

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Puunjalostustekniikan laitos  
Kirjasto

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-  
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 6.11.1995.

Työn valvoja

apul.prof. Markku Karlsson

Työn ohjaaja

apul.prof. Markku Karlsson

Tekijä, työn nimi	
Ismo Pietari: LAMINAATTIRAKENTEEEN KEHITTÄMINEN HALLITSEMALLA SEN KÄYRISTYMISKÄYTTÄYTYMISTÄ	
Päivämäärä: 6.11.1995	Sivumäärä: 105
Osasto, laitos, professuuri Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto Puunjalostustekniikan laitos Puu - 21 Paperitekniikka	
Työn valvoja apul. prof. Markku Karlsson	Työn ohjaaja apul. prof. Markku Karlsson
<p>Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, mistä materiaalien ominaisuuksista muovietiketillisen tarralaminaatin käyristyminen johtuu ja miten laminaatin valmistusprosessin muuttujilla vaikutetaan laminaatin käyristymiseen.</p> <p>Muovitarraalaminaatin kosteuskäyristyminen on ongelma, mikä alentaa laminaatin käyttökelpoisuutta. Laminaatin käyristyminen aiheuttaa syöttö- ja luovutushäiriöitä painatuksessa ja etiketöinnissä.</p> <p>Kirjallisuusosassa tarkastellaan mahdollisia tarralaminaatin käyristymisen syitä ja esitetään perusteet kokeellisessa osassa käytetyille menetelmille. Kokeellisessa osassa tutkittiin numeerisen käyristymismallin avulla materiaaliparametrien vaikutusta laminaatin käyristymiseen. Valmistusprosessin vaikutuksen tutkimista varten muokattiin olemassa oleva laskentamalli laminaatin valmistusprosessin simulointiin. Molempien menetelmien luotettavuus verifioitiin mittausten ja koeajojen avulla. Työn aikana rakennettiin mittalaitteisto taustapapereiden sorptioisotermien määrittystä varten.</p> <p>Varsinainen syy tarralaminaatin kosteuskäyristymiseen on taustapaperin kosteuspitoisuuden eroaminen sen tasapainokosteuspitoisuudesta käyttöympäristössä. Työn kuluessa määritettiin eri taustapapereille optimaaliset kosteuspitoisuudet eri käyttöympäristöihin mitattujen sorptioisotermien avulla. Normaleissa paineolosuhteissa (ilman suhteellinen kosteus 50 % ja lämpötila 25 °C) glassiinipaperin kosteuden tulee olla noin 6 %, jotta kosteutta ei siirtyisi ilman ja paperin välillä aiheuttaen käyristymistä. Päälystettyjen sellupapereiden kosteuden pitää olla noin 5 %.</p> <p>Prosessisimulointien avulla tutkittiin taustapaperin kosteuspitoisuuden riippuvuutta liiman kuivatustavasta. Jos liimaan jää kosteutta, niin kosteus imeytyy taustapaperiin muuttaen sen kosteuspitoisuutta varastoinnin aikana. Liiman kuivatuksessa on vältettävä taustapaperin liiallista kuivatusta eli ilmakuivattimia on syytä käyttää vain liiman puolella. Simuloinneilla tutkittiin myös höyrykostutuksen muuttujien vaikutusta taustapaperin kostumiseen. Tulosten mukaan kostuminen oli tehokkainta, jos paperi jäähdytettiin sekä ennen että jälkeen kostuttimen.</p> <p>Käyristymismallin avulla osoitettiin, että laminaattirakenteen kimmoisia ominaisuuksia kuvaavien parametrien vaikutus laminaatin käyristymiseen on varsin pieni. Sitä vastoin taustapaperin poikkisuuntaisen kosteuslaajeneman pienentäminen vähentää selvästi laminaatin kosteuskäyristymistä. Taustapaperin käyristyminen vaikuttaa koko laminaatin käyristymiseen, mutta taustapaperin kosteuslaajenema on paperin käyristymistä merkittävämpi tekijä. Jos taustapaperilla on käyristymistäipumus eri suuntaan kuin laminaatilla, niin se vähentää hieman laminaatin käyristymistä. Materiaaliparametreista laminaatin käyristymiseen vaikuttavat merkittävästi myös paperin ja muovin paksuudet. Paperin paksuntaminen ja muovin ohentaminen vähentävät simulointien mukaan selvästi laminaatin käyristymistä. Taustapaperin päälystäminen molemmilta puolilta vähentäisi laminaatin käyristymistä, koska tällöin laajeneva osa (kuituverkosto) joutuisi lähemmäksi laminaatin keskilinjaa.</p> <p>Soveltamalla diplomityön aikana edelleen kehitettyjä simulointimalleja yhdessä työkaluna tuotantokoneelle voidaan tuotantoprosessia optimoida käyristymisen suhteen sekä kehittää ja hallita laminaatin rakennetta.</p>	



Author and name of the thesis

Ismo Pietari:

THE DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF THE LAMINATE BY CONTROLLING  
THE BEHAVIOUR OF THE CURLING

Date: 6.11.1995

Number of pages: 105

Faculty, Department, Professorship:

Process Engineering and Material Science

Department of Forest Products Technology

Puu - 21 Paper Technology

Supervisor

Assoc. Prof. Markku Karlsson

Instructor

Assoc. Prof. Markku Karlsson

The aim of this work was to find out the reasons which cause the curling of laminate and how to affect the curling by using process parameters.

The influence of the material parameters on curling were studied by using a numeric model. The influence of the process parameters were studied by another model. The both methods were verified. The measuring apparatus of the sorption isotherms were developed for this work.

The main reason of the curling is the moisture content of the release paper. If the moisture content of the paper differ from the equilibrium moisture content in the converting environment, the laminate curls. This is a result of the hydroexpansivity of the paper. The moisture content of the glassine paper should be 6 % and the moisture content of the kraft paper should be 5 % in the normal converting environment (atmospheric moisture 50 % RH and temperature 25 °C).

The moisture content of release paper depends on the drying of adhesive. If there is too much moisture in the adhesive after drying, the paper will absorb moisture during the storage. On the other hand it is important to avoid drying the paper too much.

It is possible to influence the tendency of the curling of the labelstock by material parameters. The reduction of the hydroexpansivity of the release paper diminishes the curling of the labelstock. The curling tendency of the release paper affects the curling of the whole labelstock, but the effect is not so important as the hydroexpansivity of the release paper. The other material parameters which have an influence on the curling are the thickness of both paper and plastic. The increase of the thickness of the paper and the reduction of the thickness of the plastic will reduce the curling. If both sides of the release paper are coated, the curling is lower when compared to the situation where only one side is coated.

It is possible to optimise the laminating process in the production line scale by applying the both models developed in this work and further to develop and control the structure of the laminate.

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Yhtyneet Paperitehtaat Oy Raflatacin Tampereen tulosityksikölle yhteisessä TEKES-projektissa VTT Energian Jyväskylän toimipisteen ja Tervakoski Oy:n kanssa.

Haluan esittää kiitokseni työn ohjaajalle ja valvojalle apul.prof. Markku Karlssonille työn aikana saamistani neuvoista ja ohjeista. Parhaimmat kiitokseni myös DI Matti Kurjelle, DI Kari Virtaselle ja DI Pasi Rajalalle hyvin sujuneesta yhteistyöstä.

Lisäksi kiitän kaikkia niitä henkilöitä, jotka auttoivat minua työni eri vaiheissa.

Espoossa 6.11.1995



Ismo Pietari

# SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	1
2 TARRALAMINAATTI JA SEN RAAKA-AINEET	2
2.1 Taustapaperi	2
2.2 Silikonipäälyste	3
2.3 Tarraliimat	5
2.4 Tarraetiketti	6
3 TARRALAMINAATIN VALMISTUSPROSESSI	7
3.1 Taustapaperin silikointi	8
3.1.1 Silikonin levitys	8
3.1.2 Silikonin verkkouttaminen	8
3.2 Tarraliiman käsittely	10
3.2.1 Liimapinnan levitys	10
3.2.2 Liiman kuivatus	12
3.3 Etiketin laminointi	14
4 PAPERIN MITTAPYSYVYYS	15
4.1 Massakoostumus	17
4.1.1 Kuitulaji ja massanvalmistusmenetelmä	17
4.1.2 Hieno- ja täyteaineet	18
4.1.3 Massa- ja pintaliimaus	18
4.2 Massan jauhatus	19
4.3 Paperin rakenne	20
4.3.1 Kuituorientaatio	20
4.3.2 Tiheys	21
4.4 Paperin kuivatus	22
4.4.1 Poikkisuuntainen kutistuma	24
4.4.2 Kuivumiskutistuman estäminen konesuunnassa	24



5 LAMINAATIN KÄYRISTYMISEN SYYT	27
5.1 Käyryyden luonnehtiminen	27
5.2 Laminaatin rakenteen vaikutus	29
5.3 Taustapaperin käyristymiseen vaikuttavia tekijöitä	31
5.3.1 Kuituorientaatio	32
5.3.2 Kuituorientaatiokulma	33
5.3.3 Hieno- ja täyteainejakauma	34
5.3.4 Tiheyserot	35
5.3.5 Kuivatuskutistuma	35
5.3.6 Kuivatuksen toispuolisuus	36
5.3.7 Kuivatusnopeus	39
5.3.8 Glassiinipaperin superkalanterointi	40
5.4 Laminointiprosessin aikaiset kostutukset ja kuivatukset	40
5.5 Laminaatin varastoinnin vaikutus	42
6 KÄYRISTYMISEN SIMULOINTI ELEMENTTIMENETELMÄLLÄ	44
6.1 Simuloinnin perusteet	45
6.2 Elementtimenetelmän soveltaminen laminaatin käyristymiseen	49
6.3 Materiaaliparametrien määrittäminen käyristymisen simulointia varten	50
6.4 Kuormitus	51
7 TARRALAMINAATIN HÖYRYKOSTUTUS	52
7.1 Paperi vettä vastaanottavana elementtinä	52
7.1.1 Kuidun sorptio-ominaisuudet	52
7.1.2 Kuitupinnan kastuminen	55
7.1.3 Veden penetraatio paperiin	56
7.1.4 Paperin kosteuden vastaanotto-kykyyn vaikuttavia tekijöitä	57
7.2 Laminointiprosessin simulointi	58
7.2.1 Perusyhtälöt kostutuksen simulointiin	59
7.2.2 Coatman-ohjelman käyttö simuloinnissa	62
8 KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO	63

## KOKEELLINEN OSA

9 NÄYTTEIDEN KÄSITTELY JA ANALYSOINTI	65
9.1 Kokeellisen osan tavoitteet	65
9.2 Materiaalit	65
9.3 Suoritetut mittaukset	67
10 TARRALAMINAATIN MATERIAALIOMINAISUUKSIEN VAIKUTUS KÄYRISTYMISEEN	68
10.1 Taustapaperien käyristyminen	68
10.2 Laminaattien käyristyminen	72
10.3 Elementtimenetelmällä saadut laminaatin ominaisuudet	73
10.3.1 Mallin rakentaminen	73
10.3.2 Muovin ja taustapaperin ominaisuudet	73
10.3.3 Taustapaperin käännön vaikutus laminaatin käyristymiseen	76
10.4 Taustapaperien sorptio-ominaisuudet	79
11 PROSESSIOLOSUHTEIDEN VAIKUTUS KÄYRISTYMISEEN	82
11.1 Taustapaperin kosteuden vaikutus laminaatin käyristymiseen	82
11.2 Taustapaperin kostutuksen ja liiman jäännöskosteuden merkitys	84
12 LAMINOINTIPROSESSIN SIMULOINTI	86
12.1 Taustapaperin kostutuksen simulointi	87
12.2 Liiman kuivatuksen simulointi	92
12.2.1 Keskimääräiset kosteudet	93
12.2.2 Liiman kosteusprofiilit kuivatuksen aikana	96
12.2.3 Tuotantokoneen liiman kuivatus	98
13 TARRALIIMAN KUIVATUSKONSEPTEJA	100
13.1 Nykyisen laminointikoneen ajotavan muutos	100
13.2 Mahdollinen laminointikoneen konfiguraatio	101
14 YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	103

## LÄHDELUETTELO

## LIITTEET

## 1 JOHDANTO

Tarralaminaatti koostuu taustapaperista, irrottamista helpottavasta kerroksesta, tarraliimasta ja tarraetiketistä. Valmiista laminaatista irrotettu tarraetiketti voidaan siirtää lopulliseen käyttökohteeseen. Muovimateriaalien käyttö etiketeissä on yleistymässä. Yksi syy tähän on tiukentuneet kierrätysvaatimukset, tällöin muoviasioidissa tulee käyttää muovietikettejä.

Tarralaminaatin käyristyminen on ongelma, joka alentaa laminaatin käyttökelpoisuutta. Laminaatin käyristyminen aiheuttaa syöttö- ja luovutushäiriöitä painatuksessa ja etiketöinnissä. Ongelma on erityisen hankala arkkimuotoisella tarralaminaatilla.

Perussyynä laminaatin käyristymiseen on sen reagointi ympäröivään kosteuteen. Eri materiaalit adsorpoivat eri määriä kosteutta ja siitä aiheutuu erilainen kosteuslaajenema. Muovietiketillisen laminaatin reagointi kosteuteen on käyristymisen kannalta hankalaa, koska muovi ei adsorpoi kosteutta itseensä. Laminaatin käyristymistä ei voida kuitenkaan tarkastella vain sen raaka-aineiden ominaisuuksien pohjalta, vaan myös valmistusprosessi ja jatkojalostus vaikuttavat käyristymistäipumukseen.

Tässä työssä selvitetään, mistä materiaalien ominaisuuksista muovietiketillisen tarralaminaatin käyristyminen johtuu ja toisaalta, miten laminaatin valmistusprosessin muuttujilla vaikutetaan laminaatin käyristymiseen. Työn tavoitteena on selvittää simulointien ja koeajojen perusteella mitkä materiaali- ja valmistusprosessin muuttujat ovat merkittävimpiä käyristymisen kannalta ja mikä on niiden yhteisvaikutus.



## 2 TARRALAMINAATTI JA SEN RAAKA-AINEET

Tarralaminaatin komponentit ovat taustapaperi, irrottamista helpottava kerros (yleensä silikoni), tarraliima ja tarraetiketti (kuva 1). Taustapaperi toimii kantavana materiaalina laminaatin valmistus- ja jalostuskoneilla sekä etiketöinnissä. Silikonin tehtävänä on antaa taustapaperille irrokeominaisuus. Tarraliiman ansiosta voidaan tarraetiketti kiinnittää suoraan lopulliseen käyttökohteeseen ilman apuaineita. Tarralaminaatin kilpailijana on lähinnä irrokkeeton tarra, jossa silikoni on etiketissä painatuksen päällä. /1,2/

	Etikettimateriaali (50-100 g/m <sup>2</sup> )
	Liima (15-25 g/m <sup>2</sup> ) Silikoni (n. 1 g/m <sup>2</sup> )
	Taustapaperi (60-140 g/m <sup>2</sup> )

Kuva 1. Esimerkki tarralaminaatin rakenteesta.

Tarraetiketin käyttökohteita ovat mm. hintalaput, tuote-etiketit, ATK-etiketit, viivakoodietiketit, osoitetarrat, termograafisesti painettavat etiketit ja sinetöintitarrat /2, 3/. Tarraetiketin kilpailijana on lähinnä mustesuihkutulostus /2/, jota käytetään mm. lehtien osoitteellistamisessa.

### 2.1 Taustapaperi

Taustapaperilta vaaditaan ajettavuutta laminointikoneella, silikoitavuutta laminointikoneella, toimivuutta stanssausalustana ja käyttökelpoisuutta etiketöintikoneella /1/. Näiden vaatimusten täyttymisen kannalta kriittisiä taustapaperin ominaisuuksia ovat

lujuus, mittapysyvyys, kemiallinen soveltuvuus, pinnan sileys ja tiiveys, paksuuden tasaisuus ja läpinäkyvyys /1,4/.

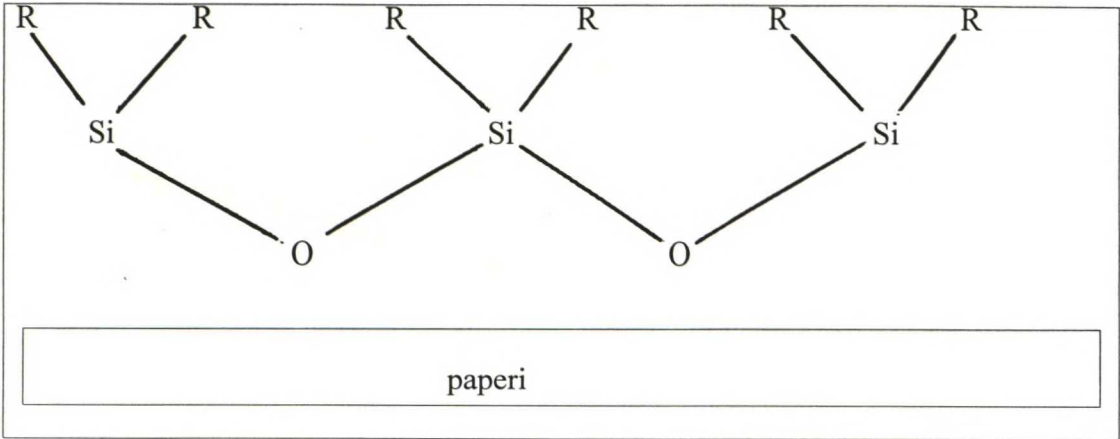
Taustapaperina käytetään useita paperilajeja. Taulukossa 1 on esitetty yleisimmät taustapaperilajit sekä eräitä niiden ominaisuuksia.

Taulukko 1. Tarran taustapaperit ja niiden ominaisuuksia /5, 6/.

Laji	Hyvät puolet	Huonot puolet
SC-voimapaperi	lujuus, läpinäkyvyys	mittapysyvyys
MG-voimapaperi	mittapysyvyys	lujuus
Pigmentti-päällystetty paperi	mittapysyvyys, pinnan sileys	lujuus
PE-päällystetty paperi	erittäin hyvä mittapysyvyys, pinnan sileys	lujuus
Glassiini-paperi	lujuus, läpinäkyvyys	erittäin alhainen mittapysyvyys

## 2.2 Silikonipäällyste

Silikonipäällyste antaa taustapaperille irrokeominaisuuden. Silikonipäällysteen asettuminen paperin pinnalle voidaan esittää tapahtuvan kuvan 2 mukaisesti. Silikonin asettumiselle on esitetty myös muita mekanismeja. Paperinjalostuksessa käytetyissä silikoneissa ryhmä R on yleensä metyyliryhmä. Silikonipolymeerien happiatomit muodostavat vetysidoksia selluloosan OH-ryhmien kanssa ja siten silikonikerros kiinnittyy paperin pinnalle. /1, 7/



Kuva 2. Silikonipolymeerin asettuminen paperin pinnalle.

Silikonilla on alhainen pintaenergia (22-24 mN/m) /8/ , mikä tekee siitä hyvän irrokemateriaalin. Nyrkkisääntö eri materiaalien tarttuvuuteen toisiinsa on se, että jos nesteen pintaenergia on pienempi kuin kiinteän aineen, niin ne tarttuvat toisiinsa /9/. Taulukossa 2 on esitetty eri materiaalien pintaenergioita.

Taulukko 2. Tarralaminaatin materiaalien pintaenergioita /1,8, 9, 10/.

Materiaali	Pintaenergia [mN/m]
Polyeteeni	30 - 31
Polypropeeni	29 - 33
Liimattu paperi	21 - 33
Tarraliima	30 - 50
Päällystyskaoliini	500
Silikoni	22 - 24
Glassiinipaperi	35 - 36

Lisäksi silikonipolymeeri on polaariton, jolloin molekyyllitason vetovoimia ei synny muiden materiaalien välillä /8/.



Silikonilla on kyky muodostaa yhtenäisiä, hyvin ohuita filmikerroksia /8/, jolloin sitä ei tarvitse annostella suuria määriä riittävän irrokeominaisuuden aikaansaamiseksi. Riittävä määrä silikonista on noin  $1 \text{ g/m}^2$  paperille päällystettäessä /8,11/. Irrottamiseen tarvittavaa voimaa voidaan säätää silikonipolymeerin seospolymeerien määrällä /12/.

Paperin päällystykseen soveltuvia silikoneja on kolmessa eri muodossa: liuottimetomana, liuottimellisena tai emulsiomuotoisena. Tarralaminaatin valmistuksessa liuottimeton silikoni on yleisin. /2,6/

### 2.3 Tarraliimat

Tarraliimoille on ominaista, että ne ovat pysyvästi tarttuvia ja kiinnittyminen tapahtuu välittömästi liimapinnan koskettaessa vastapintaa /11/.

Liiman toiminnallisia ominaisuuksia luonnehtivat tartuntanopeus, tartuntalujuus ja koheesiolujuus. Toiminnallisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa liiman polymeeroitumismuuttujien, kopolymeerien ja seosaineiden avulla. Pienimoolimassaisilla liimoilla on tyypillisesti hyvät tartuntaominaisuudet, mutta huono koheesiolujuus. Moolimassan kasvaessa edellinen huononee ja jälkimmäinen paranee. Eräällä yhdistelmällä tartuntalujuus saavuttaa maksiminsa. /2,11/

Yleisimmät käytetyt tarraliimatyyppit jaetaan tuotantomenetelmänsä mukaan liuotin-, emulsio- ja suletetarraliimoihin /11/.

Tarraliimat jaetaan kemiallisesti kumipohjaisiin liimoihin ja akrylaattiliimoihin. Perinteisten kumipohjaisten liimojen pääpolymeerinä on luonnonkumi tai synteettinen kumi, ja niiden ominaisuuksia säädellään hartsein. Termoplastisten kumiin pääpolymeerinä voi olla styreeni-isopreeni-styreeni. Termoplastisten kumipohjaisten liimojen ominaisuuksia säädellään hartsein ja lisäainein. Akrylaattiliimojen

pääpolymeerina on usein etyyli- tai butyyliakrylaatti. Ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa kopolymeroimalla eri monomeereja. Tarrasovelluksissa käytetty liimakerros on noin 20 g/m<sup>2</sup> /2, 11/.

## 2.4 Tarraetiketti

Etikettimateriaalilta vaaditaan ajettavuutta jalostusprosesseissa, painettavuutta, toimivuutta etiketöintivaiheessa ja toimivuutta etikettinä /2/.

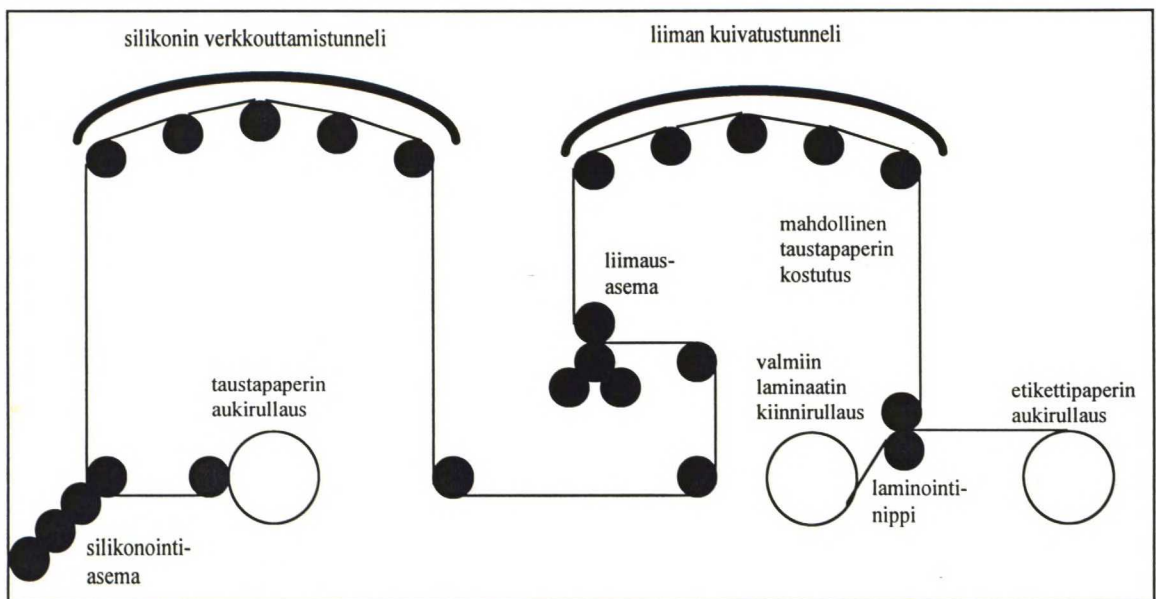
Tarraetikettinä käytetään paperia, paperimodifikaatteja (kuten lateksi-impregoidut), muoveja (PE, PP, PET, PVC) ja metallifolioita. Jokaisella näillä on erilaiset paino-, kestävyys-, ympäristönsuojelulliset ja ulkonäölliset ominaisuudet, joten etikettimateriaali täytyy valita käyttökohteen mukaan. /13/

Koko maailman tarraetiketeistä noin 5-20 % on muuta materiaalia kuin paperia (vaihtelee alueittain) /14/, ja paperin suhteellisen osuuden ennustetaan yleisesti laskevan /3/. Länsi-Euroopassa tarrasovelluksiin käytettävistä muovietiketeistä on noin 50 % PVC:a, 45 % polyolefiineja ja loppujen ollessa pääosin PET:ä.

### 3 TARRALAMINAATIN VALMISTUSPROSESSI

Laminointi suoritetaan ratamuotoisilla materiaaleilla. Laminaatin valmistus koostuu silikonin aplikoinnista ja kovettamisesta, liiman aplikoinnista ja kuivattamisesta sekä etiketti- ja taustamateriaalin laminoinnista toisiinsa (kuva 3).

Laminaatti voidaan valmistaa myös kahdella erillisellä koneella. Tällöin taustapaperi silikonoidaan erillisellä koneella ja toimitetaan jalostajalle. Jalostaja levittää liiman ja laminoi etikettimateriaalin. Menetelmä ei vaadi niin suuria investointeja, mutta heikentää mahdollisuuksia vaikuttaa laminaatin ominaisuuksiin.



Kuva 3. Tarralaminaatin valmistusprosessi

Etikettipaperi voidaan primerpäällystä ja/tai koronakäsitellä ennen laminointia. Tällöin valmistusprosessiin kuuluu lisäksi joko primerin levitys- ja kuivatuslaitteisto tai koronalaiteisto.



### 3.1 Taustapaperin silikointi

#### 3.1.1 Silikonin levitys

Erilaisia menetelmiä silikonipäällysteen siirtämiseksi rainalle on runsaasti. Yleisimmin käytetyt menetelmät ovat rasteritelapäällystys, lankasauvapäällystys ja monitelapäällystys. Muita käytettyjä silikonipäällystysmenetelmiä ovat vastatelapäällystys, ilmaharjapäällystys ja teräpäällystys.

Suurin osa liuottimellisista silikonipäällysteistä aplikoidaan paperin pintaan rasteritelapäällystyksellä. Päällysteen määrää voidaan hallita rasterin koolla ja muodolla. Päällystemäärään vaikuttavat myös koneen nopeus, päällysteseoksen viskositeetti sekä päällystettävän radan ominaisuudet. /8/

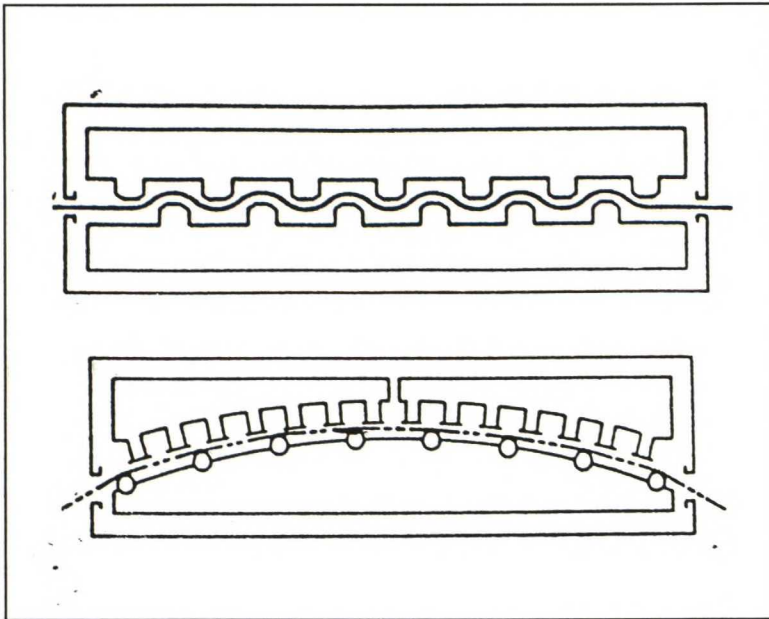
Jotkut liuottimellisista silikonipäällysteistä ja lähes kaikki emulsiosilikoneista aplikoidaan radan pintaan lankasauvapäällystyksellä. Sauvapäällys toimii hyvin päällystyseksilla, joilla on alhainen viskositeetti. /8/

Käytännöllisesti katsoen kaikki liuottimetomat silikonipäällysteet aplikoidaan paperin pintaan monitelapäällystyksellä. Jotta saavutettaisiin haluttu silikonimäärä paperin pinnalle, on huomioitava koneen nopeus, paperin jännitys ja ominaisuudet, telojen väliset nopeuserot ja raot sekä sively- ja painotelan rataa kohdistama paine. /8,15/

#### 3.1.2 Silikonin verkkouttaminen

Silikonin verkkoutumiseen käytettävä kuivatustunneli on silikointikoneen eniten energiaa kuluttava yksikkö /16/.

Kuivatukseen käytetään joko leijukuivattimia tai tuettuja kuivattimia. Leijukuivattimessa raina kulkee ilmasuihkujen tukemana ja tuetussa päällepuhalluskuivaimessa telojen tukemana. Näiden molempien kuivaimien periaatekaaviot on esitetty kuvassa 4. Joskus silikonin verkkouttamisen apuna käytetään infrakuivaimia /8/.



Kuva 4. Leijukuivain ja tuettu päällepuhalluskuivain /16/.

Tuetussa päällepuhalluskuivaimessa ilmasuuttimet ovat tavallisesti rainan yläpuolella. Kaaritunnelissa rainan suunta muuttuu  $1-5^\circ$  jokaisen telan kohdalla. Tämä vähentää rainan reunojen lepatusta ja säästää tilaa. /16/

Käytettäessä platinakatalyyttia verkkoutumisajat vaihtelevat 5 - 55 sekuntiin riippuen kuivatuslämpötilasta. Kuivatuslämpötilan nosto nopeuttaa verkkoutumista. Näin se periaatteessa mahdollistaa tuotantonopeuden nostamisen. Lämpötila heikentää kuitenkin paperin ominaisuuksia. Lisäksi liian korkea kuivatuslämpötila aiheuttaa verkkouttajan haihtumista, josta saattaa seurata epätäydellinen verkkoutuminen. Kuivatustunnelin on

oltava riittävän pitkä, jotta nopeutta nostettaessa kuivatuslämpötilaa ei tarvitsisi nostaa liian korkealle verkkoutumisen tapahtumiseksi. /16/

### 3.2 Tarraliiman käsittely

#### 3.2.1 Liimapinnan levitys

Tarraliima voidaan levittää liuoksena, emulsiona tai sulateliimana erilaisille pinnoille. Levitystavan valinta riippuu ennenkaikkea liiman reologisista ominaisuuksista ja halutusta liimakerroksen paksuudesta. Myös päällystettävä materiaali vaikuttaa käytettävään menetelmään. Tarraliima levitetään etikettisovelluksissa lähes poikkeuksetta taustapaperin sililikonipinnalle, josta se siirtyy laminointivaiheessa etikettiin. /11, 17/

Tarraliiman paksuus valmiissa laminaatissa on yleensä 15-25 µm (15-25 g/m<sup>2</sup>) /17/. Käytetty menetelmä ei yleensä määrää suurinta mahdollista linjanopeutta vaan yleensä nopeuden määrää liiman kuivuminen /11/. Taulukossa 3 on esitetty liuotin- ja emulsiopohjaisten tarraliimojen levitysmenetelmien toiminta-alueet.

Taulukko 3. Päällystysmenetelmien toiminta-alueet /11/.

päällystysmenelmä	viskositeetti (mPas)	suurin nopeus (m/min)	päällysteen määrä (g/m <sup>2</sup> )
terä (jäykkä)	5000 - 15000	150	20 - 100
terä (joustava)	100 - 20000	1500	3 - 15
lankasauva	10 - 200	200	3 - 25
ilmaharja	10 - 1000	750	3 - 20
vastatela			
nippisyöttö	1000 - 6000	300	10 - 200
allassyöttö	200 - 6000	100	10 - 200
rasteritela	100 - 2000	700	3 - 20
suulake	500 - 20000	200	20 - 100

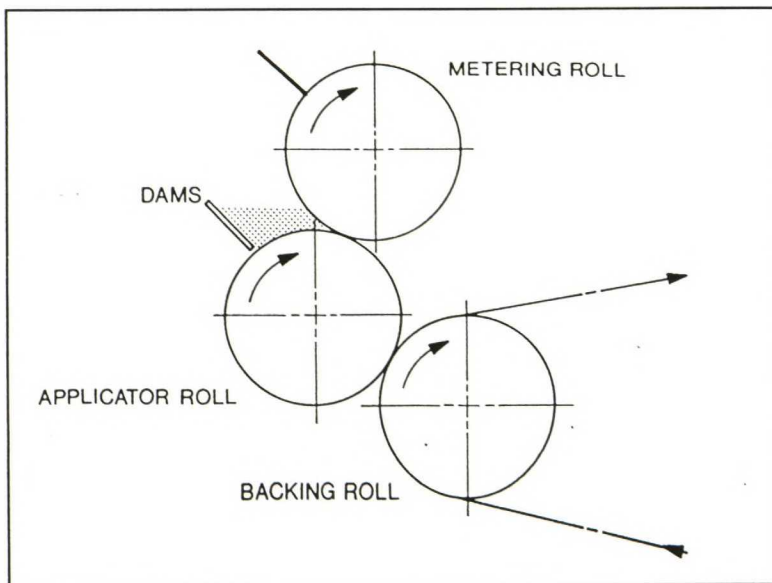
Lankasauvapäällystyksessä sivelytelan avulla rataa nostetaan liimaa, josta ylimäärä poistetaan pyörivällä sauvalla. Liimakerroksen paksuus suurenee sauvan ympärillä



olevien lankojen välien suurentuessa. Liimakerroksen paksuuden hallinta on helppoa sauvapäälystyksessä. Huonoina puolina ovat vaahtoamisongelmat emulsioliimoilla ja liiman viskositeetista riippuva päälystysnopeus (korkeampi viskositeetti → alempi nopeus). /18/

Teräpäälystyksessä liiman määrä säädetään radan pintaan päälystysterän avulla. Ylimäärä liimaa tuodaan rataa joko telan tai kaukalon avulla. Liiman määrää voidaan säätää terän kulmalla ja muodolla sekä liiman viskositeetilla ja reologialla /18/. Menetelmää käytetään sekä liuotin- että emulsioliimoille. Emulsioliimoilla ongelmana on suurien partikkeleiden juuttuminen terän ja radan väliin, jolloin seurauksena on liimakerroksen viiruuntuminen /11, 17/.

Vastatelapäälystys (kuva 5) on yksi yleisimmistä käytetyimmistä liiman levitystavoista tarralaminaatin valmistuksessa. Liima tuodaan rataa sivelytelan avulla, ja liiman määrää säädetään telanopeuksien suhteilla sekä annostelu- ja sivelytelan välisellä raolla. Menetelmä soveltuu liuotin-, emulsio- että myös sulateliimoille (teloja lämmitettävä). Telapäälystystä käytetään myös silikonin applikoointiin. Tällöin käytetään yleensä nimitystä monitelapäälystys ja sivelytela pyörii radan suuntaisesti. /11,18/



Kuva 5. Esimerkki telapäälystyksestä. Kolmitelainen vastatelapäälystys nippisyötöllä /17/.



Rasteritelapäällystyksessä kaiverrettu tela puristetaan kumitelaa vasten samalla päällystäen rainan. Päällysteen määrä säädetään rastereiden koolla ja muodolla ja on suhteellisen riippumaton päällystyskoneen nopeudesta. Menetelmä soveltuu liuotin- ja emulsioliimoille. Sulateliimoilla käytetään useimmiten offset-rasteritelapäällystystä /17,18/

Suulakepäällystyksessä liima tuodaan radan pintaan suuttimen avulla. Liiman määrää säädetään radan nopeudella ja liiman pumppausnopeudella. Suulakepäällystystä voidaan käyttää liuotin-, emulsio- ja sulateliimoille. Hyvinä puolina ovat vähäinen vaahtoaminen ja liiman juovaisuus. Huonoina puolina ovat päällystysmäärän vaihtelut ja suuttimen ajoittainen tukkeutuminen. /18/

Ekstruusiopäällystyksellä voidaan applikoida sulatetarraliimoja radan pintaan. Tekniikalla on mahdollista käsitellä korkeaviskoottisia tarraliimoja (250 - 1500 Pas). Menetelmällä saavutetaan lyhyt läpimenoaika, jolloin säästetään tuotantokustannuksissa ja liiman hajoaminen minimoituu. /11/

### 3.2.2 Liiman kuivatus

Tarraliiman kuivatuksen tavoitteena on poistaa kaikki vesi tai liuotin liimasta. Liiman kuivatus on nykyisin tuotantoa rajoittava tekijä tarralaminaatin valmistuksessa. /19/

Liiman kuivuminen alkaa jo ennen liimatun radan saapumista kuivattimelle, sillä vettä alkaa imeytyä taustapaperiin. Imeytyneen veden määrä riippuu pohjapaperin adsorptiokyvystä ja liiman vesiretentiosta. Silikoni vähentää veden imeytymistä, mutta ei pysty estämään sitä. Radan tullessa kuivattimeen siirretään siihen lämpöä, jolloin radan lämpötila ensin kasvaa ja saavutettuaan riittävän korkean lämpötilan veden haihtuminen liiman vapaalta pinnalta nopeutuu. Radan lämpenemisvaiheessa veden

imeytyminen taustapaperiin jatkuu, mutta haihtumisen alettua veden kulkusuunta kääntyy kohti liiman pintaa./2,19/

Liiman kuivatuksessa käytetään samanlaisia laitteistoja kuin silikonin verkkouttamisessa eli infra-, leiju- tai tuettuja kuivattimia. Liiman kuivatuksessa käytetään kuitenkin alhaisempia lämpötiloja kuin silikonin tapauksessa. Tällä estetään liimapinnan kupliminen. /19/

Liuotinainepohjaiset liimat kuivuvat nopeasti johtuen liuottimen nopeasta haihtumisesta. Haihtuvista liuotinaineista johtuva räjähdysvaara rajoittaa kuitenkin tuotantonopeutta tai kuivatusilman kierrätystä /16/. Tarraliimoissa käytetyistä liuottimista nopeimmin haihtuu etyyliasetaatti, sitten tolueeni ja hitaimmin sykloheksaani /19/. Haihtuneen liuottimen käsittelylle on kolme vaihtoehtoa: liuottimen päästö ilmaan, talteenotto tai poltto. Ympäristövaatimukset asettavat tiukkoja vaatimuksia liuottimen talteenottolaitteistolle ja tuotantolinjan ilmastoinnille /15/.

Emulsioliimoilla haihtumisnopeudet ovat noin viisi kerta pienempiä kuin liuotinliimojen, mutta emulsioliimojen kuivumisnopeus voi silti olla suurempi samanlaisella laitteistolla. Tähän on syynä emulsioliimojen suurempi kuiva-ainepitoisuus (emulsio 60 - 70 %, liuotin 25 - 45 %). /19/

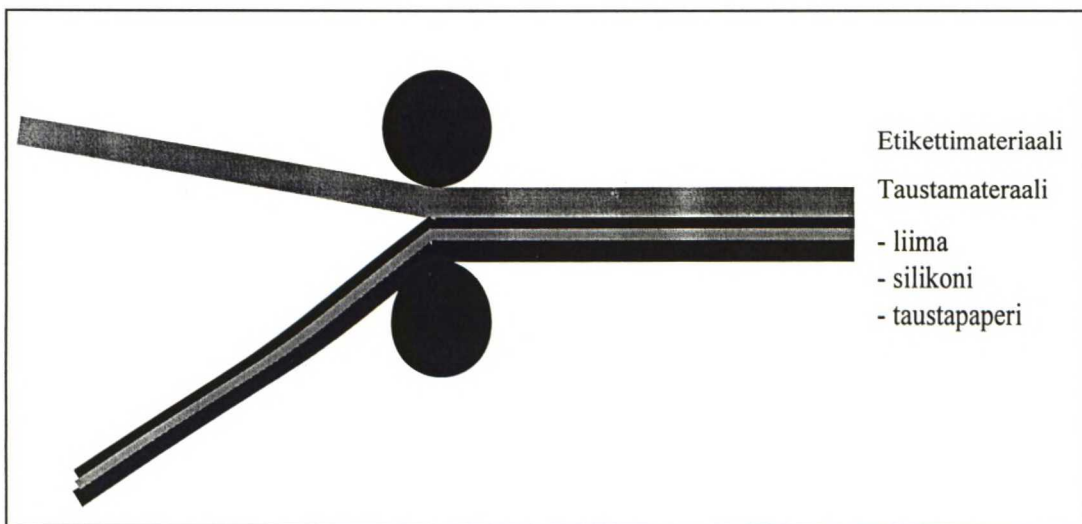
Koska sulateliimat annostellaan 100 % kuiva-ainepitoisuudessa, ei niitä tarvitse erikseen kuivata. /16/

Emulsio- tai sulateliimoilla ei ole ongelmia myrkyllisten tai räjähdysherkkien päästöjen syntymisessä /15/.

### 3.3 Etiketin laminointi

Viimeinen vaihe tarralaminaatin valmistuksessa on etikettimateriaalin laminointi liimapintaiseen taustapaperiin. Laminoinnissa liima siirtyy silikonin pinnasta etikettimateriaaliin.

Laminointi suoritetaan kuvan 6 mukaisessa laminointinipissä. Ennen laminointia voidaan taustapaperia kostuttaa, jotta laminaatti ei käyristyisi myöhemmissä käyttövaiheissa. Käyristymisen kannalta on myös tärkeätä, etteivät tausta- ja etikettimateriaalin ratakireydet ole liian suuret.



Kuva 6. Yksinkertaistettu kuva etiketti- ja taustamateriaalin laminoinnista.

Etikettimateriaali voidaan ennen laminointia primerpäälystää ja/tai koronakäsitellä. Näitä käytetään, jos etikettimateriaali on sellaista, että liima imeytyisi läpi ilman primeria tai halutaan parantaa liiman tarttuvuutta ja etiketin painettavuutta. /2/

#### 4 PAPERIN MITTAPYSYVYYS

Paperin mittapysyvyydellä eli dimensiostabiiliteetilla tarkoitetaan paperin mittojen pysymistä vakiona sen joutuessa kosteus-, lämpötila- tai mekaanisten kuormitusten alaiseksi.

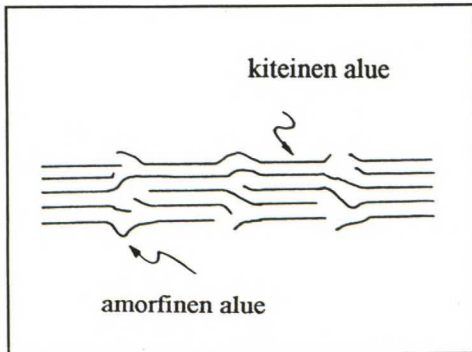
Paperin mittamuutokset johtuvat pääasiassa sen reagoinnista kosteuteen. Taulukosta 4 nähdään, että paperin kosteuslaajenemiskerroin on noin kymmenen kertaa suurempi kuin sen lämpölaajenemiskerroin. Taulukosta nähdään myös, että paperilla on selvästi suurempi kosteuslaajenemiskerroin kuidun säteen kuin pituusakselin suuntaan.

Taulukko 4. Paperin laajenemiskertoimien arvoja /20/.

materiaali	kosteuslaajenemis- kerroin, $10^{-4} \% / \%RH$	lämpölaajenemis- kerroin, $10^{-4} \% / C^{\circ}$
konesuunta	20 - 40	3 - 8
poikkisuunta	77 - 237	8 - 16
paksuussuunta	1400 - 2800	- -

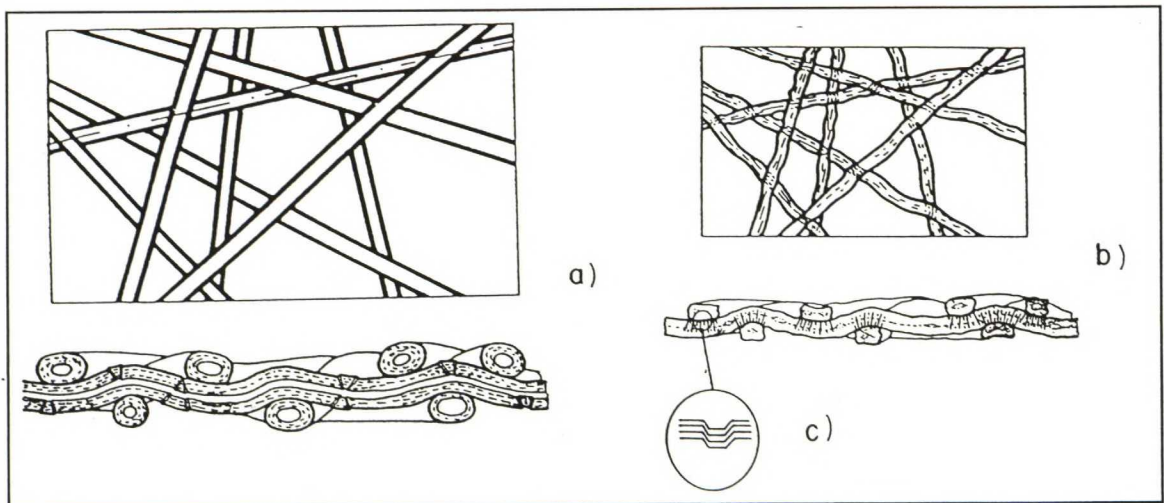
Erot kosteuslaajenemiskertoimissa johtuvat selluloosamolekyylin rakenteesta. Selluloosa on polysakkaridi, joka on muodostunut lukuisista glukoosimolekyyleistä. Selluloosamolekyylit voivat muodostaa sidoksia toistensa kanssa, jolloin varsinaisen selluloosakuidun lamellimainen rakenne muotoutuu. Selluloosakuidusta voidaan erottaa sekä kiteisiä että amorfisia alueita (kuva 7). Koska vesi voi päästä kiteiselle alueelle ainoastaan lamellien väliin ja jos amorfisten alueiden osuus on pieni, niin turpoaminen ja kutistuminen tapahtuu kuidun säteen suunnassa. Pituussuunnassa kuitu voi turvota pääasiassa ainoastaan amorfisten alueiden kohdalla./20/





Kuva 7. Selluloosakuidun rakenne /21/.

Kuitujen mittojen muutokset vaikuttavat koko paperin mittojen muutoksiin. Kuitujen kutistumisen ja paperin kutistumisen välinen yhteys voidaan selittää Pagen kutistumisteorian avulla /22/. Kuitujen kutistuessa ne kutistuvat poikkisuunnassa myös kuitusidosten kohdalla. Poikkisuunnassa kutistuva kuitu pakottaa siihen sitoutuneen kuidun vetäytymään kokoon pituussuunnassa. Tällöin kuitujen sitoutumattomat osat vetäytyvät mutkalle (kuva 8).



Kuva 8. Tyylitelty kuva kuituverkostosta ennen ja jälkeen kuivatuksen /21/.

- a) turvonneita kuituja ennen kuivatusta
- b) kutistuneita kuituja vapaan kuivatuksen jälkeen
- c) kuituseinämän mikrokompressio kuitujen risteyskohdassa

Paperin mittapysyvyyteen voidaan vaikuttaa kaikilla niillä keinoilla, jotka muuttavat paperin kutistumaa kuivatuksen aikana. Mitä suurempi on paperin kutistuma kuivatuk-

sen aikana, sitä suuremmaksi muodostuu kosteuslaajenema. Kuivumiskutistuman suuruuteen vaikuttavat mm. kuitusidosten lujuus ja määrä sekä kutistuman estäminen.

#### 4.1 Massakoostumus

##### 4.1.1 Kuitulaji ja massanvalmistusmenetelmä

Kuitujen reagointi kosteuden muutoksiin on erilaista eri kuitulajeilla. Enemmän hemiselluloosaa sisältävä kuitu turpoaa kastuessaan enemmän ja myös kutistuu kuivuessaan enemmän kuin vähän hemiselluloosaa sisältävä kuitu, koska hemiselluloosa on täysin amorfista. Kuitujen sitoutuminen toisiinsa suurenee hemiselluloosapitoisuuden kasvaessa. Ligniini päinvastoin hydrofobisena aineena vähentää kuidun reagointia kosteusvaihteluihin.

Mittapysyvyyttä parantaa kuidun jäykkyys, koska jäykällä kuidulla on suurempi kyky vastustaa pituussuuntaista puristusta kuivatuksen aikana. Paksuseinäisillä kuiduilla on parempi mittapysyvyys kuin ohutseinäisillä kuiduilla. Kesäpuuosuuden kasvaminen suurentaa kuidun seinämäpaksuutta ja sitä kautta mittapysyvyyttä./23/

Lehtipuumassalla on yleensä huonompi mittapysyvyys kuin havupuumassalla samalla jauhatuksella /23/.

Massan valmistustapa vaikuttaa paperin mittapysyvyyteen. Eri valmistusmenetelmät poistavat eri määriä ligniinistä ja selluloosasta, jolla on edellä esitetyn mukaisesti vaikutusta mittapysyvyyteen. Hiokkeesta tai hierteestä valmistettu paperi ei reagoi yhtä paljon kosteuden muutoksiin kuin kemiallisesta massasta valmistettu paperi (taulukko 5) /24/.

Taulukko 5. Erilaisten massojen vaikutus paperin mittapysyvyyteen /24/.

	mekaaniset massat		kemialliset massat	
	hioke	hierre	sulfiitti	sulfaatti
kosteuslaajenemiskerroin <sup>a</sup>				
- vapaasti kuivatut arkit	0,086	0,074	0,123	0,092

<sup>a</sup>kosteuslaajenemiskerroin = arkin mittamuutos (%) / kosteuspitoisuuden muutos (%)

Keräyskuidun mittapysyvyys paranee kierrätyskertojen lisääntyessä, koska sellukuitujen turpoamiskyky huonontuu joka käytön jälkeen. Toisaalta keräysmassojen suuri hienoaineen määrä saattaa huonontaa uusiopaperin mittapysyvyyttä./23,25/

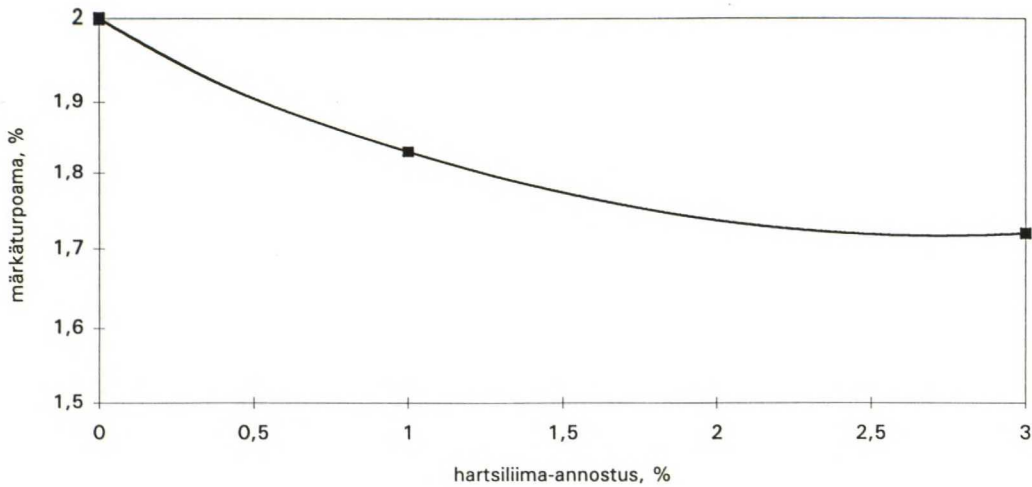
#### 4.1.2 Hieno- ja täyteaineet

Hienoaineen määrän lisääntyminen lisää paperiarkin kosteuslaajenemista, etenkin jos arkki on saanut kutistua vapaasti, ilman kuivatuskutistuman estämistä. Hienoaineet lisäävät sidosten syntymistä paperissa toimimalla liima-aineena niiden kuitujen välillä, jotka muuten olisivat liian kaukana toisistaan kuitusidosten syntymiseksi. Hienoaineella on itsellään taipumus muuttaa mittoja kosteuden muuttuessa. Mineraaliset täyteaineet ei reagoi suuresti veteen ja vähentävät kuitujen välisiä sidoksia. Tämän pitäisi parantaa paperin mittapysyvyyttä. /20,26/

#### 4.1.3 Massa- ja pintaliimaus

Paperin liimauksella voidaan vähentää sen reagoitua kosteuteen. Paperin hydrofobiliimaus suurentaa veden ja paperin välistä kosketuskulmaa, jolloin veden pääsy kuituverkostoon vaikeutuu.

Kuvassa 9 on esitetty liimauksen vaikutus paperin mittapysyvyyteen.



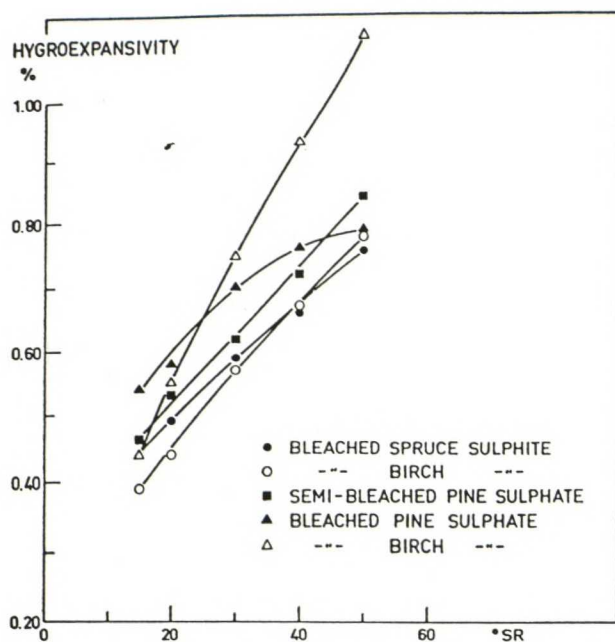
Kuva 9. Hartsiliima-annostuksen vaikutus irrokepaperin mittapysyvyyteen /7/.

#### 4.2 Massan jauhatus

Massan jauhatus vaikuttaa oleellisesti paperin kosteusmuodonmuutokseen. Kuitujen välisiä sidoksia syntyy enemmän ja yksittäisen sidoksen pinta-ala kasvaa jauhatusmäärän lisääntyessä /27/. Kuitujen välisillä sidoksilla on suuri merkitys arkin kutistumiseen. Jauhamattomasta massasta valmistetun paperin vapaasti kuivuneen tasonsuuntainen kutistuma saattaa olla 1-2 % eli samansuuruinen kuin yksittäisen kuidun pituussuuntainen kutistuma. Jauhetusta massasta valmistettu paperi saattaa kutistua jopa 20 %. Jos massa on pitkälle jauhettu, kuitujen poikkisuuntainen kutistuma voi siirtyä sidosten välilyksellä lähes kokonaisuudessaan paperiarkin rakenteeseen. /28/

Vähän jauhetun paperin rakenne on harva, jolloin yksittäiset kuidut voivat muuttaa mittojaan ilman, että koko rakenteen mitat muuttuvat. Kuvasta 10 nähdään, kuinka jauhatuksen lisääminen on kasvattanut mittamuutoksia paperissa.





Kuva 10. Jauhatuksen vaikutus erilaisten laboratorioarkkien mittapysyvyyteen /23/.

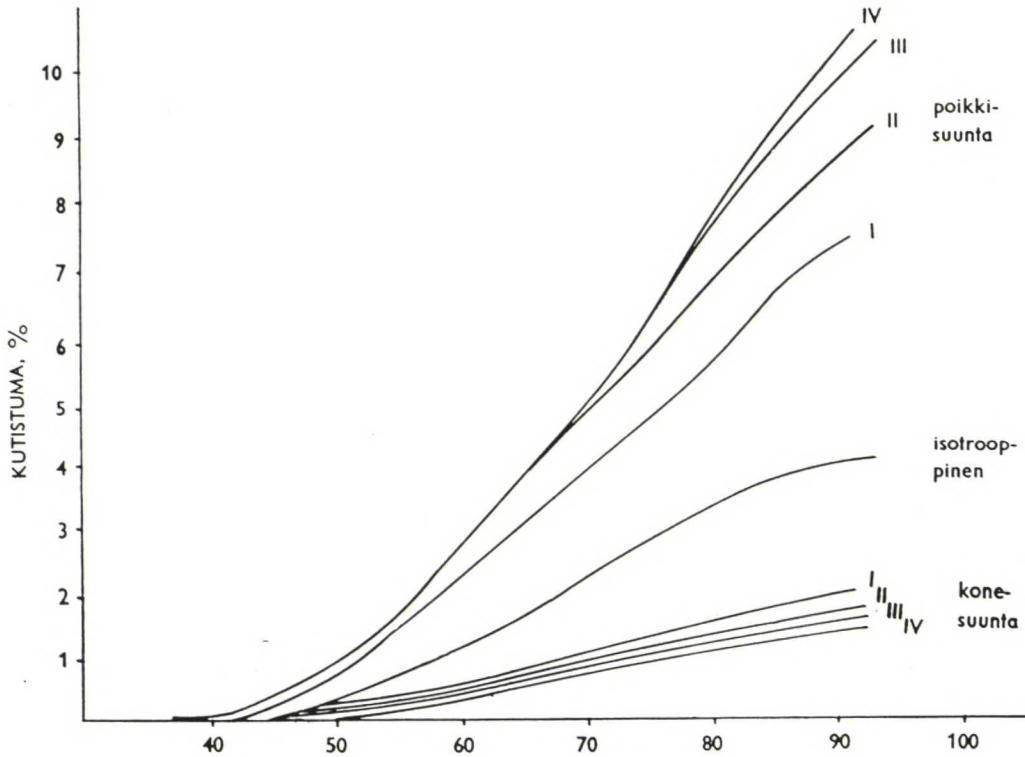
Jauhatuksen vaikutus paperin mittapysyvyyteen riippuu kuitenkin paperin kuivatuksesta. Jauhatuksen huonontava vaikutus paperin mittapysyvyyteen pienenee estettäessä kuivatuskutistumaa. /24/

### 4.3 Paperin rakenne

#### 4.3.1 Kuituorientaatio

Paperin kuituorientaatio ilmaisee, mikä määrä kuituja osoittaa kuhunkin suuntaan. Koska kuitujen keskimääräinen pituus on suurempi kuin normaalin paperin paksuus, asettuvat kuidut paperin tason suuntaisiksi. Yleensä paperikoneella valmistetussa paperissa kuidut ovat suuntautuneet enemmän kone- kuin poikkisuuntaan.

Koska kuitujen kosteuslaajeneminen on suurempaa poikki- kuin pituussuunnassa, niin tämä johtaa arkin suurempaan mittojen muuttumiseen poikkisuunnassa kosteuden vaihdellessa. Kuvassa 11 on esitetty vapaasti kuivattujen arkkien kutistuminen eri orientaatioasteilla.



Kuva 11. Vapaasti kuivatetun arkin kutistuminen kuivatuksessa /28/.

I pienin ja IV suurin konesuuntainen orientaatio.

#### 4.3.2 Tiheys

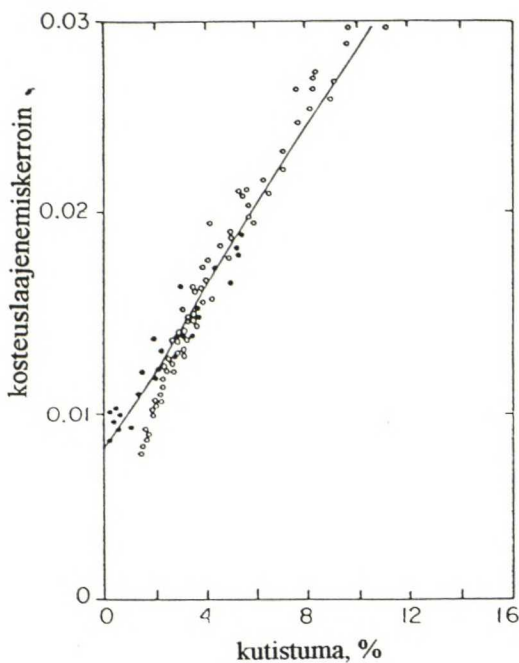
Paperin tiheyteen voidaan vaikuttaa jauhatuksella, täyteaineilla, märkäpuristuksella ja kalanteroinnilla.

Paperin tiheys vaikuttaa sen mittapysyvyyteen. Tiheyden kasvaessa paperin sisällä on vähemmän tyhjiä kohtia ja enemmän kuitujen välisiä sidoksia, jolloin vapaasti

kuivuneen arkin kosteuslaajenema suurenee tiheyden kasvaessa. Jännityksen alaisena kuivatun arkin kosteuslaajenema sen sijaan hieman pienenee tiheyden kasvaessa.

#### 4.4 Paperin kuivatus

Paperin kuivatuksen aikana raina alkaa kutistua, kun kuiva-ainepitoisuus ylittää tietyn rajan (riippuu paperilajista ja valmistusolosuhteista). Se, kuinka paljon määrin rainan annetaan kutistua, vaikuttaa valmiin paperiarkin kosteuslaajenemiseen. Kuvassa 12 on esitetty kosteuslaajenemisen riippuvuus arkin kuivatuskutistumasta. Mitä suurempi on kutistuma, sitä suuremmaksi muodostuu kosteuslaajenemiskerroin.

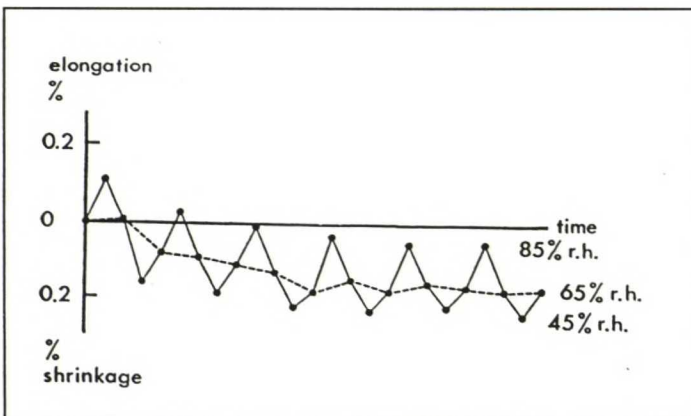


Kuva 12. Kosteuslaajenemiskertoimen riippuvuus paperin kutistumasta [21].

Kosteuslaajenemiseen vaikuttaa myös se, missä kuiva-ainepitoisuudessa paperin kutistuminen estetään. Mitä suurempaan kuiva-ainepitoisuuteen paperin kuivatuskutistuma estetään tai sitä venytetään, sitä pienemmäksi arkin kosteuslaajeneminen muodostuu.

Arkin potentiaalisella kutistumalla tarkoitetaan arkin kuivuessa syntyvää kokonaiskutistumaa, jos arkin kutistumista ei mekaanisesti estetä. Estettäessä kutistuminen kuivatuksen aikana joko kokonaan tai osittain on todellinen kutistuma pienempi kuin potentiaalinen kutistuma. Potentiaalisen ja todellisen kutistuman erotusta kutsutaan jähmettyneeksi venymäksi. Suurin osa tästä venymästä on pysyvää, mutta osa palautuu, jos paperia kostutetaan ja kuivataan uudelleen. Mitä vähemmän paperi on saanut kuivuessaan kutistua, sitä suurempia ovat palautumattomat mittamuutokset. Kuivatusjännitykset siis lisäävät palautumattomia mittamuutoksia ja pienentävät palautuvaa kosteuslaajenemaa. /28/

Kuivumisen vaikutuksesta kiinnittynyttä arkin sisäistä jännitystilaa kutsutaan jähmettyneeksi jännitykseksi. Jähmettynyt jännitys siis kasvaa jähmettyneen venymän kasvaessa. Arkin kastuessa uudelleen sitä kutistava jähmettynyt jännitys vapautuu ja seurauksena on, että kostutettu arkki laajenee sitä vähemmän, mitä suurempi jähmettynyt venymä siihen on jäänyt kuivausvaiheessa. Jos arkki saa kostutuksen jälkeen kutistua vapaasti, jähmettynyt venymä vetää arkin kokoon. Tämä selittää kuvassa 13 esitetyn tilanteen, jossa arkki kutistuu jatkuvasti toistuvissa kostutus-kuivatuskäsittelyissä /28/.



Kuva 13. Paperin mittojen muutos ympäröivän ilman kosteuden muuttuessa /29/.



#### 4.4.1 Poikkisuuntainen kutistuma

Paperiraina kutistuu paperikoneella poikkisuunnassa. Poikkisuuntainen kutistuma johtuu puristimen ja kuivatusosan välillä tapahtuvasta konesuuntaisesta venytyksestä sekä kuivatusosalla tapahtuvasta poikkisuuntaisesta kutistumasta. Hienopaperiraina kutistuu poikkisuunnassa eniten kuivatuksen aikana, mutta sanomalehtiraina kutistuu märkävenytyksessä yhtä paljon kuin kuivatuksessa /30/. Tämä johtuu siitä, että hienopaperin Poisson-suhde (poikkisuuntaisen kutistuman ja konesuuntaisen venymän suhde) on 0,1-0,25 ja sanomalehtipaperin 0,25-0,5 /31/. Poisson-suhteeseen vaikuttaa kuitukoostumus, kuituorientaatio, rainan kuiva-ainepitoisuus ja tiheys venytyskohdassa sekä kuivatusosan rakenne /32/.

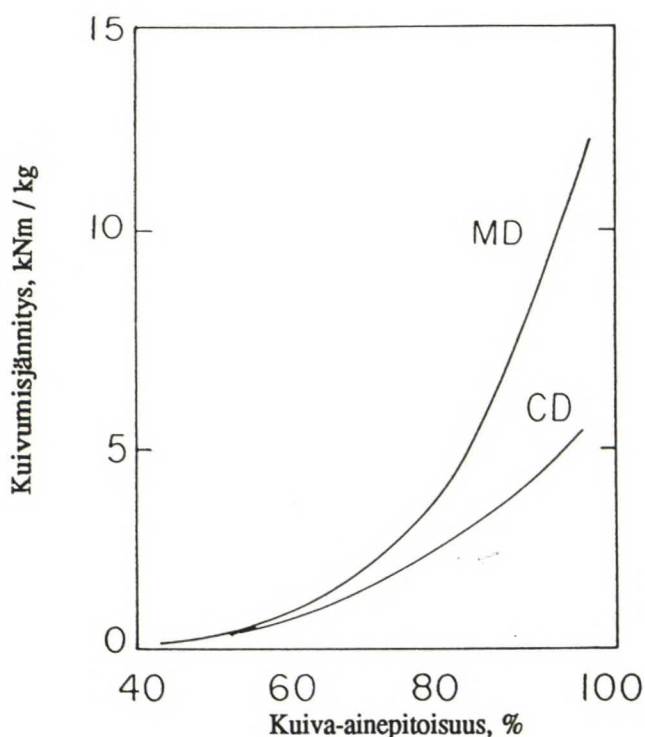
Raina pääsee kutistumaan poikkisuunnassa reunoiltaan vapaasti, mutta rainan keskusta ei. Rainan keskustan kutistumista rajoittaa kitka kuivatussylintereitä ja -huopia vasten sekä näiltä tukipinnoilta avoimeen ventiin välittyvä poikkisuuntainen jännitys. Lisäksi keskustan kutistuminen edellyttää sitä, että se vetää reunan mukanaan. Rainan reunasta leikattujen arkkien kosteuslaajeneminen on tällöin keskustasta leikattuja suurempi. Radan kutistumista poikkisuunnassa voidaan vähentää perinteisessä sylinterikuivatuksessa jonkin verran löysäämällä kuivatusryhmien välisiä vetoja tai kiristämällä kuivatushuopia. Konesuuntaista kutistumaa voidaan hallita tyydyttävästi kuivatusryhmien nopeuserojen avulla. /33/

#### 4.4.2 Kuivumiskutistuman estäminen konesuunnassa

Estetyssä kutistumisessa paperiin syntyy suuria kuivumisjännityksiä. Kuivumiskutistuman ollessa estetty kuivumisjännitysten kehittyminen kuiva-ainepitoisuuden funktiona on aluksi hidasta. Kehitys alkaa kiihtyä sulfaattimassalla

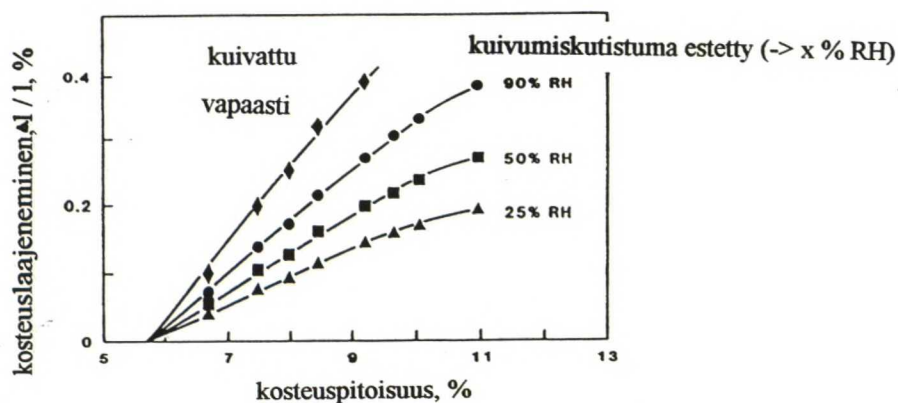
vasta noin 70 % kuiva-ainepitoisuudessa ja on suuremmilla kuiva-ainepitoisuuksilla hyvin nopeata, mikä nähdään kuvasta 14. /21, 33/

Kuivumisjännitysten nopea nousu johtuu selluloosan amorfisten alueiden ja hemiselluloosien kovettumisesta, jolloin kuitusegmentit eivät enää pääse liukumaan toistensa lomitse. Mekaanisessa massassa on vähemmän näitä amorfisia alueita kuin kemiallisessa massassa, minkä vuoksi kemiallisesta massasta tehdystä paperissa jännityksiä alkaa muodostua alemmassa lämpötilassa. /34/



Kuva 14. Kuivumisjännityksen kehittyminen estettäessä kuivumiskutistuma täysin /21/.

Paperin mittapysyvyyttä ei voida kuitenkaan suoraan ennustaa kuivatuskutistumasta tai kuivatusjännityksestä, sillä mittapysyvyys riippuu siitä, missä kuiva-ainepitoisuudessa kutistuma estetään (kuva 15).



Kuva 15. Kosteuslaajenemisen riippuvuus kuivumiskutistuman estämisestä /35/

Kuivatusnopeudella voidaan myös vaikuttaa mittapysyvyyteen. Mitä nopeammin paperirata kuivuu, sitä pienemmäksi muodostuu kosteuden aiheuttama mittamuutos /36/. Sylinterikuivatuksessa tämä johtuu siitä, että paperiraina kutistuu eniten kuiva-ainepitoisuusalueella 60-80 % ja kutistuminen tapahtuu pääasiassa sylintereiden välisissä vapaissa vedoissa.

## 5 LAMINAATIN KÄYRISTYMISEN SYYT

Valmiin tarralaminaatin käyristymisen myöhemmissä käsittelyvaiheissa voi aiheuttaa materiaalien erilainen reagointi kosteuteen, materiaalien erilainen kosteuspitoisuus tai se, että kosteus muuttuu laminaatin eri pinnoilla eri tavalla.

Tarralaminaatin käyristymistä tutkittaessa on huomioitava materiaalien ominaisuudet ja valmistus, laminaatin valmistusprosessi sekä valmistuksen jälkeinen käsittely.

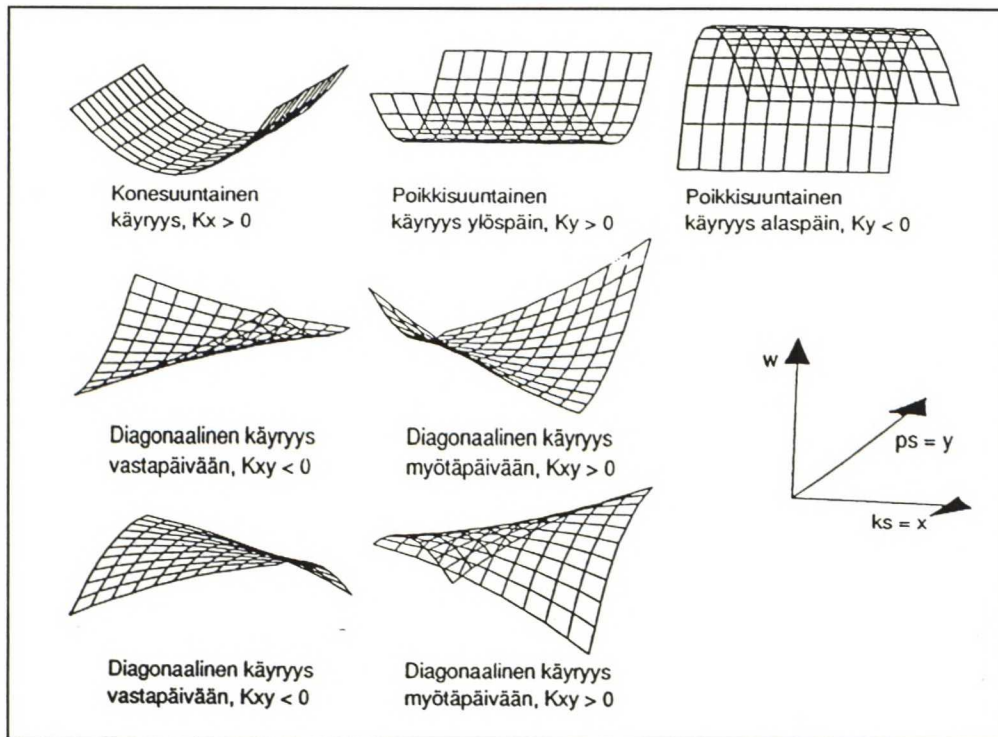
### 5.1 Käyryyden luonnehtiminen

Käyryys on minkä tahansa kappaleen muodon poikkeamista tasosta. Käyristyminen tarkoittaa, että käyryys muuttuu tai on muuttunut jonkin syyn seurauksena /37/. Käyristyminen johtuu siitä, että kappaleen mitat muuttuvat erilailla sen ylä- ja alapinnalla. Käyryyden tai käyristymisen luonnehtimiseen tarvitaan käyristymisen suuruus, käyristymissuunta (kone- ja poikkisuuntainen sekä diagonaalinen käyryys) ja käyristymispuoli (ylä- tai alapuoli). Käyryyden symbolina käytetään kirjainta  $K$ . Yksikkönä on  $[K] = 1/m$ , koska kaarevuus  $K$  on pinnan kaarevuussäteen käänteisarvo. Käyristymissuunnat voidaan erottaa alaindekseillä  $x$ ,  $y$  ja  $xy$  (kone- ja poikkisuuntainen sekä diagonaalinen käyryys). Kuvassa 16 positiiviset  $K_x$ :n ja  $K_y$ :n merkit tarkoittavat paperin yläpintaa kohti ja negatiiviset alapintaa kohti käyristynyttä näytettä./25/

Jos käyryysakseli poikkeaa kone- tai poikkisuunnasta, paperi on diagonaalisesti käyrää. Diagonaalisesti käyrän arkin vierekkäiset nurkat ovat eri korkeudella arkin keskustaan verrattuna. Diagonaalisen käyryyden etumerkki kuvaa sitä, missä suunnassa konesuunta on käyryysakselista./25/



Paperissa voi esiintyä myös ns. kuppikäyristymistä tai satulakäyristymistä. Edellisessä  $K_x$ :n ja  $K_y$ :n etumerkit ovat saman- ja jälkimmäisessä erimerkkiset. Nämä käyristymisen muodot saadaan esille vain jos näyteko on hyvin pieni, koska suurilla näytteillä on taipumus ottaa itselleen sylinterimäinen muoto.



Kuva 16. Paperin käyristymissuunnat /25/.

Paperin käyristyminen voidaan jakaa kolmeen osaan: valmistuksen jälkeinen käyryys, palautuva käyristyminen (kosteuskäyristymä) ja palautumaton käyristymä. Paperin valmistuksen jälkeinen kaarevuus riippuu paperirainan rakenteesta ja kuivatuksen toispuoleisuudesta. Se voidaan mitata välittömästi paperin tultua koneelta, kun kosteuserot eivät ole vielä vaikuttaneet siihen. Kosteuskäyristymä havaitaan muuttamalla ympäröivän ilmankosteutta. Esimerkiksi jos muutetaan ilmankosteutta 25 % RH:sta 65% RH:een normaalissa huoneen lämpötilassa, käyristymä muuttuu yleensä palautuvasti. Eli jos paperi käyristyy ylöspäin kosteuden noustessa, niin se palautuu alkuperäiseen muotoonsa, kun kosteuspitoisuus laskee takaisin 25 % RH:een. Palautumaton käyristymä syntyy kuitujen sisäisten jännitysten lauettessa/muuttuessa kosteuden tai lämmön vaikutuksesta. Tämä voi tapahtua, kun edellä mainittu paperi

joutuu huoneen lämpötilassa noin 65-75 % RH:een tai korkeaan lämpötilaan esimerkiksi lasertulostuksen aikana./20,25/

Paperin käyristymiseen vaikuttavat samat mekanismit kuin sen mittapysyvyyteen, mutta käyristyminen aiheutuu yleensä mittamuutoksen aiheuttavien ominaisuuksien vaihtelusta paperin z-suunnassa. Jo pienet ylä- ja alapinnan mittaerot voivat aiheuttaa merkittävää käyristymistä. Paperin paksuuden kasvaminen vähentää käyryyttä.

Arvioitaessa paperin käyristymistä tai käyristymää tulisi ottaa huomioon paperin loppukäyttöolosuhteet, koska niistä riippuen saman paperin käyristyminen voi vaihdella suuresti /20/. Esimerkiksi sanomalehtipaperi kostuu usein painatuksessa toispuoleisesti ja kopio- ja tulostuspaperi voi joutua korkeisiin lämpötiloihin lasertulostimissa. Ei siis ole järkevää mitata esimerkiksi sanomalehtipaperin käyristymistä lasertulostuksessa; parempi kuva saadaan toispuolisella kostutuksella ja mittaamalla käyristymä. Samoin on tärkeätä huomioda laminaatin käyristymistä tutkittaessa sen loppukäyttö. Muovipintaisella tarralaminaatilla suurin ongelma on kosteuskäyristymä, koska painatuksen aikana kosteutta siirtyy vain taustapaperin ja ilman välillä.

## 5.2 Laminaatin rakenteen vaikutus

Tarralaminaatti voi koostua hyvin erilaisista materiaaleista. Laminaatin etikettinä voidaan käyttää papereita, muoveja tai metallifolioita. Taustapapereitakin on useita eri laatuja. Eri materiaaleilla on toisistaan poikkeavat ominaisuudet, mikä vaikuttaa myös eroihin käyristymisessä.

Jos etiketti- ja taustamateriaalin mitat muuttuvat eri suuruisesti esimerkiksi kosteuden vaikutuksesta, niin tarralaminaatti käyristyy. Käyristymän suuruutta tiettyyn suuntaan voidaan arvioida yhtälöllä 1 /38/. Yhtälössä 1 oletetaan kerrokset yhtä paksuiksi. Yhtälöstä 1 ei kuitenkaan voida ratkaista käyristymisen todellisia arvoja, koska

käyristymisen aiheuttama laminaatin reunanousema on huomattavasti suurempi kuin laminaatin paksuus. Tähän palataan luvussa 6.

$$K = \frac{24 \times (\Delta d_1 - \Delta d_2) / d_0}{t \times (E_2 / E_1 + E_1 / E_2 + 14)} \quad (1)$$

missä

$K$  käyristymä ( $m^{-1}$ )

$\Delta d$  kerroksen pituuden muutos (m)

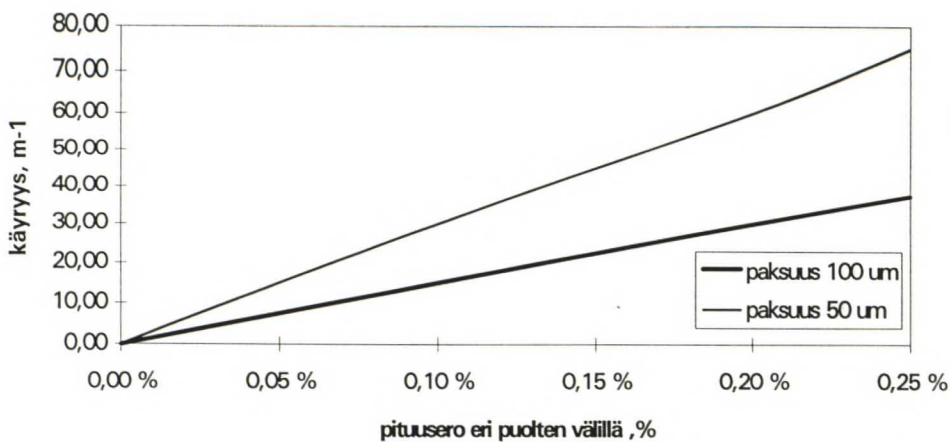
$d_0$  kerroksen alkuperäinen pituus (m)

$E$  kimmomoduli (MPa)

$t$  koko laminaatin paksuus (m)

1,2 kerros

Mitä suurempi on eri kerrosten mittojen muutosten erotus, sitä enemmän valmis laminaatti käyristyy. Kuvassa 17 on esitetty, kuinka käyristymän suuruus riippuu mittojen muutoksista ja laminaatin paksuudesta.



Kuva 17. Laminaatin käyristyminen eri puolten pituuseron ja paksuuden funktiona.



Laminaatilla, joka on valmistettu kosteusreaktiivisesta taustapaperista ja muovietiketistä, on suuri käyrystymistäipumus kosteuden muuttuessa. Muovimateriaalin mittojen muutos kosteuden vaikutuksesta on erittäin vähäistä. Jos laminaatti joutuu tasapainokosteuttaan suurempaan kosteuteen, niin taustapaperi alkaa laajeta. Koska muovietiketti ei laajene, niin laminaatti käyristyy voimakkaasti yhtälön 1 ja kuvan 17 mukaisesti. Laminaatti saattaa siis käyristyä vaikka taustapaperi ei itse käyristyisikään.

Paperietikellinen laminaatti ei käyristy yhtä helposti, koska tällöin myös etikettimateriaali laajenee kosteuden vaikutuksesta.

Todellisuudessa laminaatti ei koostu kahdesta yhtä paksusta homogeenisestä kerroksesta, kuten yhtälössä 1 on oletettu. Varsinkin paperin ominaisuudet muuttuvat paksuussuunnassa. Kuten aikaisemmin on todettu, niin kosteuskäyristymiseen voimakkaasti vaikuttava kuituorientaatio voi olla toispuoleista.

Tarralaminaatilla taustapaperin paksuuden kasvaminen vähentää käyristymistä /39/. Tämä johtuu paksuuden lisäämästä paperin jäykkyydestä. Taustapaperin paksuntaminen aiheuttaa myös sen, että laminaatin paksuussuuntainen keskikohta joutuu lähemmäksi taustapaperin kosteudelle avointa pintaa. Varsinkin muovietiketeillä voidaan ajatella laminaatin käyristymän vähenevän siitä syystä, että keskikohdan yläpuolella (lähempänä etikettiä) olevien kuitujen laajeneminen kompensoi alapuolen kuitujen laajenemista.

### 5.3 Taustapaperin käyristymiseen vaikuttavia tekijöitä

Edellä on todettu, että muovipintainen tarralaminaatti on käyristymisen kannalta hankala, koska muovi ei reagoi kosteuteen. Laminaatin käyristymiseen riittää taustapaperin kosteuslaajenema. Taustapaperilla voi kuitenkin olla itselläänkin käyristymistäipumusta, mikä saattaa joko suurentaa tai pienentää laminaatin käyristymistä.



### 5.3.1 Kuituorientaatio

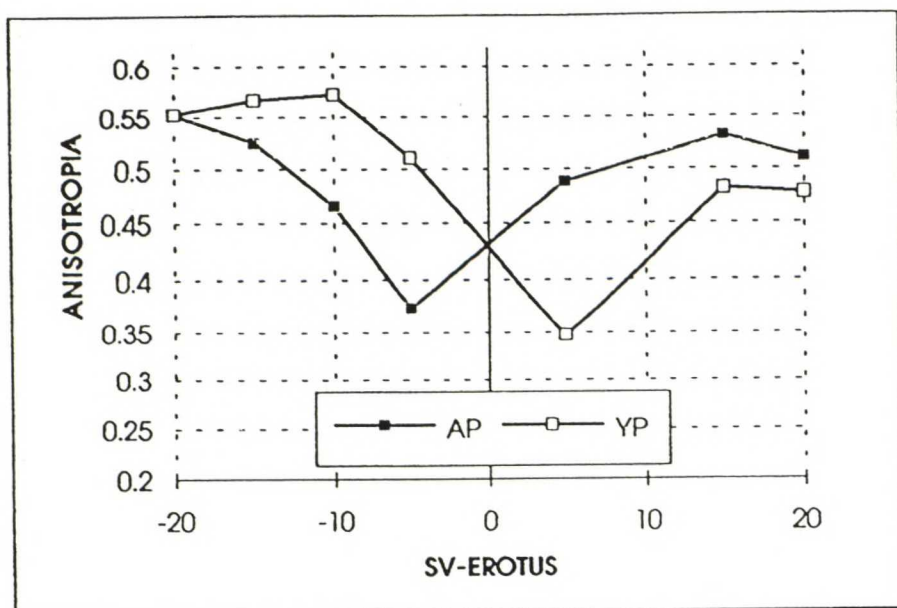
Tärkeimpiä paperin kosteuslaajenemiseen vaikuttavia ominaisuuksia on kuituorientaatio, jonka toispuoleisuudella on selvä yhteys käyristymiseen. Paperi, jolla on suuri konesuuntainen kuituorientaatio, kutistuu (tai laajenee) enemmän poikkisuunnassa kuin paperi, jolla on pienempi konesuuntainen kuituorientaatio. Kuten jo aikaisemmin todettiin, on kosteuslaajeneminen paljon suurempaa kuidun säteen suunnassa kuin kuidun akselin suunnassa./20,35/

Jos paperin eri puolilla on erilainen kuituorientaatio, niin kosteuden muuttuessa tapahtuu käyristymistä. Jos paperin kuidut ovat orientoituneet paperin alapuolella enemmän konesuuntaan kuin paperin yläpuolella, kosteusmuutosten seurauksena syntyvä suurempi poikkisuuntainen kuitujen turpoaminen aiheuttaa rainan alapuolen suuremman muodonmuutoksen poikkisuuntaan. Tällöin voidaan olettaa esimerkiksi 50 %:n RH:ssa tasaisena olevan rainan käyristyvän korkeammassa ilmankosteudessa poikkisuunnassa yläpuolta kohti ja alhaisemmassa alapuolta kohti. Tasoviirakoneella valmistetulla paperilla on siis yleensä rakenteellinen käyristymistaipumus poikkisuunnassa kohti yläpuolta kosteuden noustessa./25/

Voidaan siis sanoa, että pintakerrosten kuituorientaatioiden erot aiheuttavat paperin palautuvaa käyristymistä. Mutta kääntäen pätee myös, että jos keskimääräinen kuituorientaatio on sama kaikissa paperin kerroksissa, niin paperi pysyy tasaisena sen kosteuspitoisuuden muuttuessa. Tämä edellyttää kuitenkin sitä, että paperi on muutenkin homogeenista /40/.

Kuituorientaation toispuoleisuuteen vaikuttaa merkittävästi viiran ja sulppusuihkun nopeusero /31,41,42/. Kuvasta 18 nähdään kuinka paperin ala- ja yläpuolen anisotropia muuttuu suihkusuhteen funktiona. Yleisesti nopeuseron itseisarvon suureneminen näyttää pienentävän pintojen välistä orientaatioeroa. Toisaalta pienin keskimääräinen

kuitu-orientaatio saadaan nopeuseron arvolla nolla /31,41/. Orientaatiojakaumaan z-suunnassa vaikuttaa myös käytetty formeri /43/.



Kuva 18. Paperin ylä- ja alapuoliskon anisotropian käyttäytyminen suihkun ja viiran nopeuseron funktiona /31/.

### 5.3.2 Kuituorientaatiokulma

Suotautumisvaiheessa kuidut pyrkivät orientoitumaan siihen suuntaan, mihin sulpun suunta on suhteessa viiran suuntaan (konesuuntaan). Jos kuidut osoittavat täysin konesuuntaan, on orientaatiokulma nolla. Jos massan virtauksessa on poikkisuuntainen nopeuskomponentti, niin tällöin kulma poikkeaa nollasta. Tyypillinen lähde poikkisuuntaiselle nopeuskomponentille on huuliaukon bombeeraus, jolla tasataan neliömassaprofiilia./32/

Eri puolten kuituorientaatiokulmien poikkeaminen toisistaan aiheuttaa diagonaalista käyristymistä, koska kuidut laajenevat tällöin eri kulmissa toisiinsa nähden. Jopa muutaman asteen ero paperin ylä- ja alapuolen kuituorientaatiokulmissa aiheuttaa

kopiopaperille voimakkaan diagonaalisen käyryyden  $K_{xy} = 3 \text{ m}^{-1}$ . Tällaisella käyryyden arvolla A4 arkin vierekkäiset kulmat eroavat 23 mm:ä arkin keskustan tasosta. /32/

Ohuilla papereilla, kuten sanomalehtipaperilla, diagonaaliseen käyristymiseen vaikuttaa puukuidun rakenne, jossa mikrofibrillit kiertyvät S2-seinämässä oikeakätisesti. Tästä johtuen ohut konesuuntainen näyteliуска pyrkii kiertymään oikeakätisesti ja poikkisuuntainen vasenkätisesti /44/. Esimerkiksi hienopapereilla ei havaita tällaista niin selvästi; siihen vaikuttavat mm. paksumpi rakenne ja mahdollinen pintaliimaus. Samoin tarralaminaatin mahdollinen diagonaalinen käyryys johtuu kuituorientaatiokulmasta eikä kuidun rakenteesta.

### 5.3.3 Hieno- ja täyteainejakauma

Kuidusta peräisin oleva hienoaine pyrkii käyristämään paperia kosteuden pienetessä sille puolelle, jossa hienoainetta on enemmän, koska hienoaine lisää sidosten syntymistä paperissa ja sillä itselläänkin on taipumus muuttaa mittojaan kosteuden vaikutuksesta. Kosteuden noustessa paperi puolestaan pyrkii käyristymään pois päin hienoainetta enemmän sisältävästä puolesta. Keskimääräisen hienoainepitoisuuden kasvaminen lisää käyristymistä, koska paperista tulee reaktiivisempaa kosteuden vaihteluihin /20,25,26/

Mineraalinen täyteaine, joka ei reagoi kosteuden muutoksiin, stabiloi paperia ja vähentää sen taipumusta käyristyä. Jos täyteainepitoisuus paperin eri puolilla on kuitenkin erilainen, saattaa paperin käyristyminen johtua tästä. /25/

Paperin hieno- ja täyteainejakauman muoto z-suunnassa riippuu olennaisesti vedenpoistavasta eli siitä, tapahtuuko suotautuminen yhteen vai kahteen suuntaan ja onko suotautuminen jaksottaista vai yhtäjaksoista. Märkäpuristuksen vaikutus hieno- ja täyteainejakauman muotoon on vähäinen /45/.



Kaikilla rainanmuodostusyksiköillä voidaan havaita, että hieno- ja täyteainepitoisuus kasvaa kohti sitä rainan pintaa, jonka kautta vesi poistuu yhtäjaksoisesti ja alenee kohti sitä pintaa, jonka kautta vesi poistuu jaksottaisesti. Luonnollisesti aivan paperin pinnassa hieno- ja täyteainepitoisuus myös yhtäjaksoisen vedenpoiston tapauksessa uudelleen hieman laskee./46/

Koska hienoaine jakautuu paksuussuunnassa samanlaisesti kuin täyteaine, niin näiden vaikutus paperin käyristymiseen saattaa kompensoitua.

#### 5.3.4 Tiheyserot

Tiheys vaikuttaa paperin käyristymiseen, sillä se liittyy läheisesti kuitujen väliseen sitoutumiseen. Paperin tiheämpi puoli on herkempi kosteusmuodonmuutoksille ja paperi kuivuessaan pyrkii käyristymään poikkisuunnassa tälle puolelle. Konesuunnassa ei vaikutus ole merkittävä. /25,35/

Tiheyserot voivat vaikuttaa käyristymiseen myös kuivatuksessa, koska paperin eri puolet kuivuvat tällöin eri nopeudella, mikä aiheuttaa käyristymistä. Käyristyminen on tässä tapauksessa kohti tiheämpää puolta./25/

Jauhatuksen ja märkäpuristuksen suurentamiset lisäävät arkin tiheyttä.

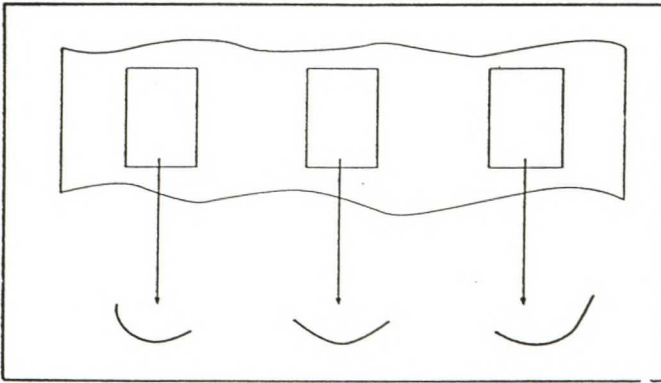
#### 5.3.5 Kuivatuskutistuma

Paperiraina kutistuu pääasiassa poikkisuunnassa märkävenytyksen ja kuivatuksen vaikutuksesta. Paperin kutistumisen estäminen aiheuttaa siihen sisäisiä jännityksiä, joiden laukeaminen aiheuttaa käyristymistä.



Kuivatuskutistuma vaikuttaa suuresti valmiin paperin mittapysyvyyteen. Mitä pienempi kutistuma on, sitä pienemmäksi muodostuu paperin kosteuden lisääntymisestä aiheutuva mittamuutos. Toisaalta pysyvä mittamuutos suurenee kuivatuskutistuman pienentyessä.

Kosteuslaajenemiskerroin on siis riippuvainen paperin kuivatuskutistumasta. Koska paperi kutistuu enemmän reunoilta kuin keskeltä, niin tällöin myös kosteuslaajenemiskertoimet ovat reunoilla suuremmat. Tämä yhdessä paperin paksuussuuntaisen rakenteen kanssa aiheuttaa erilaista käyristymistä eri kohdissa paperirataa (kuva 19).



Kuva 19. Käyristymän poikkisuuntainen profiili /47/.

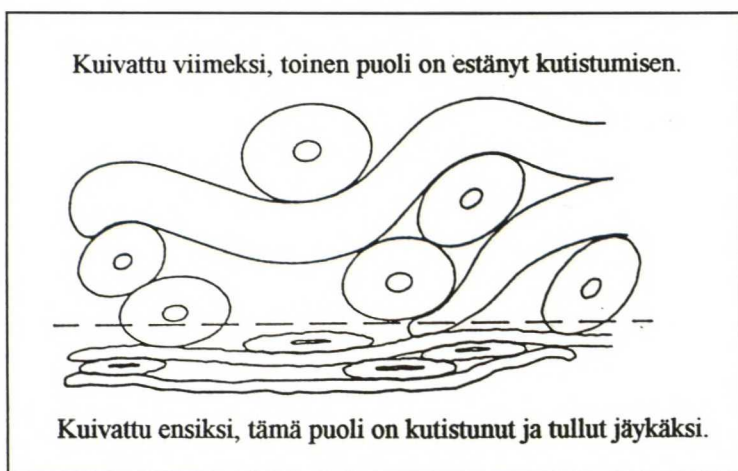
### 5.3.6 Kuivatuksen toispuolisuus

Kuivatuksen toispuolisuutta pidetään kuituorientaation ohella eniten paperin käyristymiseen vaikuttavana tekijänä. Rakenteelliselta mittapysyvyydeltään tasainen paperi käyristyy, jos paperi kuivataan toispuoleisesti tai epätasaisesti. Toispuoleisesti kuivatun paperin puolten mitat ovat erilaiset, mikä vastaa käyristymistä. Toispuolinen kuivatus voi johtua ylä- tai alasyhintereiden lämpötilaerosta tai paperin rakenteen toispuolisuudesta /20, 25/. Kuivatuksen epätasaisuus poikkisuunnassa voi johtaa epätasaiseen käyryysprofiiliin (kuva 19). /22/

Paperin paksuussuunnassa voi kuivatusjännityksillä olla selvä ero eri kerroksissa. Tämä on yleisin syy siihen käyryyteen, mikä voidaan mitata suoraan paperikoneelta tulleesta paperista ennen kosteusmuutosten vaikutusta./48/

Jännitystilojen ero eri kerroksissa eli jännitysgradientti johtuu kuivatuskutistumista, mitkä vaikuttavat kun paperin toinen puoli on kuivunut ennen toista puolta. Kun paperiarkki kuivuu, niin kuidut alkavat kutistua veden poistumisen johdosta. Ennen kuin kuitujen väliset sidokset ovat muodostuneet, niin yksittäisten kuitujen mittojen muutoksilla on vähän vaikutusta arkin mittoihin. Kuitusidosten muodostumisen jälkeen arkin mittoihin vaikuttavat suuresti kuitujen mittamuutokset./20,28/

Jos arkin molempia puolia ei kuivattu samalla nopeudella, niin nopeammin kuivunut puoli kutistuu ja vetää märempää puolta puristukseen (kuva 20). Kun kuivuminen jatkuu, niin märempi puoli kuivuu ja kutistuu verrattuna ensiksi kuivattuun puoleen. Tällöin ensiksi kuivattuun puoleen syntyykin suurempi jännitystila. Tästä on seurauksena arkin käyristyminen kohti sitä puolta, joka kuivattiin/kuivui viimeiseksi. Kuivatus voi aiheuttaa käyryyttä, vaikka paperin rakenteessa ei olisi eroja eri puolilla paperia./20,28,49/



Kuva 20. Arkin epätasainen kuivatus /50/.

Yleensä sylinterikuivatuksessa yläsylinterit ovat alasyylintereitä kuumempia, jolloin paperin alapuoli kuivuu ensiksi. Tästä on seurauksena edellä esitetyn mukaisesti paperin käyristyminen ylöspäin. Toinen mahdollisuus on se, että kun paperin alapuoli on sylintereiltä lähtiessä kuivempi ja myös lyhyempi kuin yläpuoli, niin paperi kaartuu sillä hetkellä alaspäin. Kosteus arkissa tasaantuu diffuusion vaikutuksesta, mutta hystereesi-ilmiön vaikutuksesta alaosa jää pysyvästi kuivemmaksi ja myös lyhyemmäksi. Tällöin paperi käyristyy alaspäin /22/. Kumpi näistä mekanismeista muodostuu vallitsevaksi, riippuu suuresti paperilajista ja konerakenteesta. Kopiopapereilla ja sanomalehtipaperilla käyristyminen tapahtuu ensiksi mainitun mekanismin mukaisesti. On oletettavaa, että viimeksi mainittu on vallitseva paksuja lajeja, kuten kartonkeja, valmistettaessa, joidenka jäykkyys yhdessä paperin viskoelastisten ominaisuuksien kanssa estää paperin nopeat muodonmuutokset, jolloin vaikutusmekanismi muuttuu.

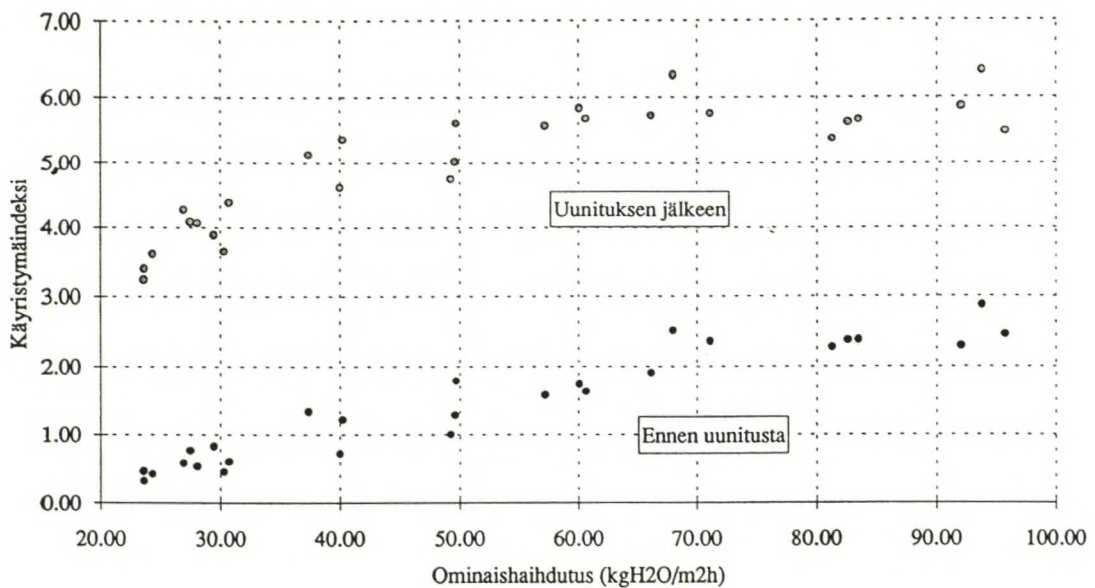
Ohuilla papereilla käyristyminen tapahtuu siis kohti sitä puolta, joka kuivattiin viimeksi eli josta kosteus poistui viimeksi. Tähän ei vaikuta se, kummalla puolella paperia lämmönlähde on ollut, vaan ainoastaan se, kumpi puoli on kuivunut ensin. /49/

Eräässä tutkimuksessa /38/ esitettiin, että käyristymissuunta riippuu kuivatuslämpötilasta: matalilla kuivatussyylintereiden lämpötiloilla käyristyminen on kohti sylintereitä ja korkeilla lämpötiloilla sylintereistä poispäin.

Eri puolten kuivumisnopeuteen vaikuttaa varsinaisen kuivatusolosuhteiden lisäksi myös paperin eri puolten rakenteelliset eroavaisuudet. Tiheämpi puoli on samalla myös vähemmän huokoinen, jolloin se kuivuu hitaammin. Tämä aiheuttaa paperin käyristymisen kohti tiheämpää puolta, jos kuivatus on ollut tasaista molemmilla puolilla. /20/

### 5.3.7 Kuivatusnopeus

Kuivatuksen nopeus vaikuttaa käyristymään. Mitä rajumpi kuivatus on, sitä enemmän paperi käyristyy palautumattomasti (kuva 21). Paperin lämpökäsittely on laukaissut sisäisiä jännityksiä, jolloin palautumaton käyristymä on suurentunut. Kuivatusnopeuden vaikutus yleisimmin paperin mittapysyvyyteen on kuitenkin päinvastainen, sillä mitä nopeammin paperi kuivuu paperikoneella, sitä pienemmäksi muodostuu kuivatuskutistuma, jolloin mittapysyvyys paranee /36/.



Kuva 21. Kuivatusnopeuden vaikutus käyristymiseen /51/.



### 5.3.8 Glassiinipaperin superkalanterointi

Osa taustapapereista kalanteroidaan, jotta saavutettaisiin riittävän sileä ja tiivis pinta silikointia varten /1, 52/.

Taustapapereiden kosteus ennen kalanterointia on 15-20 % ja kalanteroinnin jälkeen noin 5 % /53,54/. Käytetyt telojen lämpötilat ovat 100-200 °C /53/. Kun paperi joutuu korkeisiin kosteuksiin ja lämpötiloihin, sen jännitykset laukeavat. Jos jännityksissä on eroja paksuussuunnassa, niin seurauksena on paperin käyristyminen. Superkalanteroinnissa paperi joutuu sellaiselle kosteus-lämpötila -alueelle /33/, missä kuidut saavuttavat pehmenemislämpötilansa ja järjestyvät uudelleen. Voidaan olettaa, että superkalanterointi poistaa taustapaperissa olevia kuivatusjännityksiä ja luo uusia jännityksiä, joiden jakauma z-suunnassa voi olla erilainen kuin ennen kalanterointia. Superkalanteroinnin aikana paperiin syntyy siis uusia jännityksiä, jotka voivat laueta laminointiprosessissa tai sen jälkeisissä jalostusprosesseissa aiheuttaen laminaatin käyristymisen.

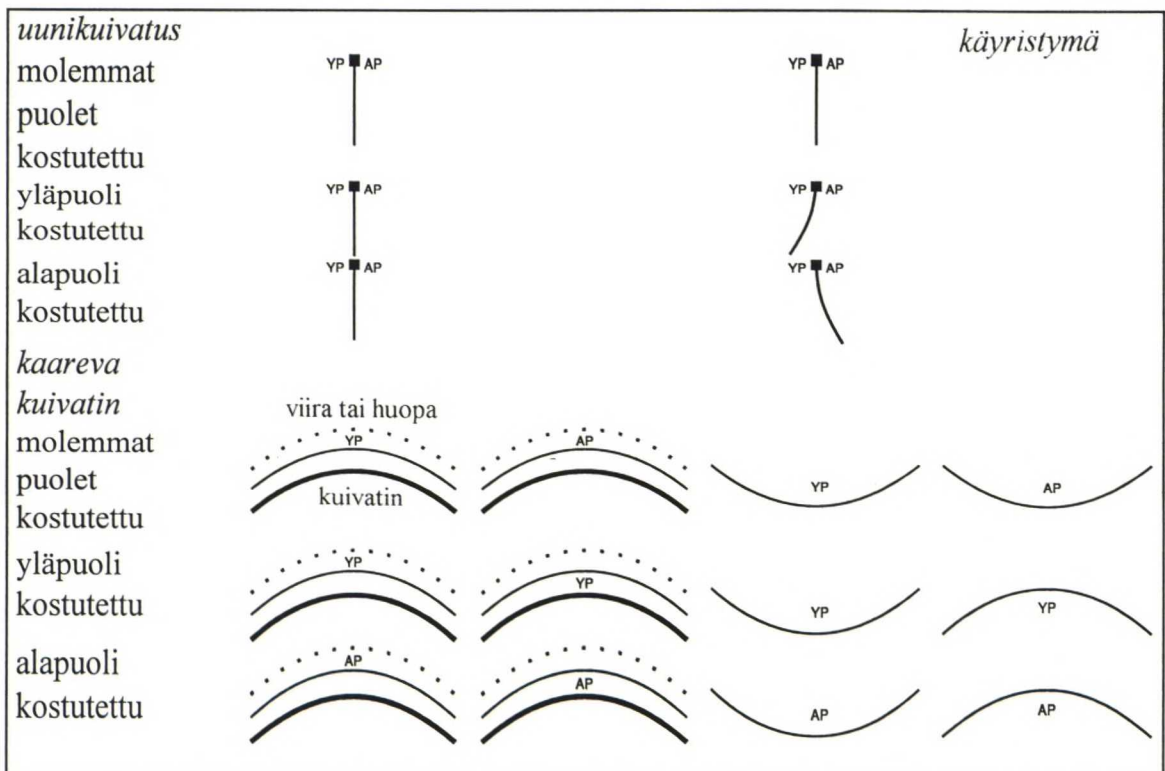
### 5.4 Laminointiprosessin aikaiset kostutukset ja kuivatukset

Laminointiprosessissa tarralaminaatin osat joutuvat korkeisiin lämpötiloihin ja kosteuksiin. Nämä olosuhteet saattavat laukaista taustapaperissa olevia jännityksiä ja aiheuttaa laminaatin käyristymistä. Toisaalta laminointiprosessissa voidaan kostutuksilla estää laminaatin myöhempää käyristymistä.

Taustapaperia voidaan laminointiprosessin aikana kostuttaa. Kostuttamalla voidaan tasata radassa olevia kosteuseroja, poistaa paperissa olevia jännityksiä tai nostaa paperin kosteuspitoisuus halutulle tasolle. Kosteuspitoisuuden nostamisella voidaan vaikuttaa

siihen, ettei taustapaperiin imeydy tai siitä poistu vettä jatkojalostusprosessien aikana.  
/39/

Eräässä tutkimuksessa selvitettiin /49/ kuinka paperin kostuttamisella ja uudelleenkuivatuksella voidaan vaikuttaa paperin käyristymiseen. Riippumatta kuivatustavasta paperi käyristyi aina kostutetulle puolelle (kuva 22). Jos kostutus tuli molemmille puolille, niin tällöin kuivatus vaikutti käyristymiseen.



Kuva 22. Uudelleen kasteltujen ja kuivattujen laboratorioarkkien käyristyminen /49/.

Laminaatin käyristymisen estämiseksi voi taustapaperin kostuttaminen olla hyvä tapa. Laminaatilla on yleensä käyristymistäipumus etikettiä kohti ympäröivän ilman kosteuden lisääntyessä. Laminaatin valmistuksen aikana paperin toispuolisella kostuttamisella voidaan vähentää laminaatin käyristymistä, koska paperin jännitykset muuttuvat.

Kostuttaminen voidaan periaatteessa suorittaa missä vaiheessa laminointiprosessia tahansa. Kostuttamispaikan valintaa rajoittaa kuitenkin silikonin verkkoutuminen tai liiman kuivuminen, jos taustapaperin kosteus vaikuttaa näihin tapahtumiin.

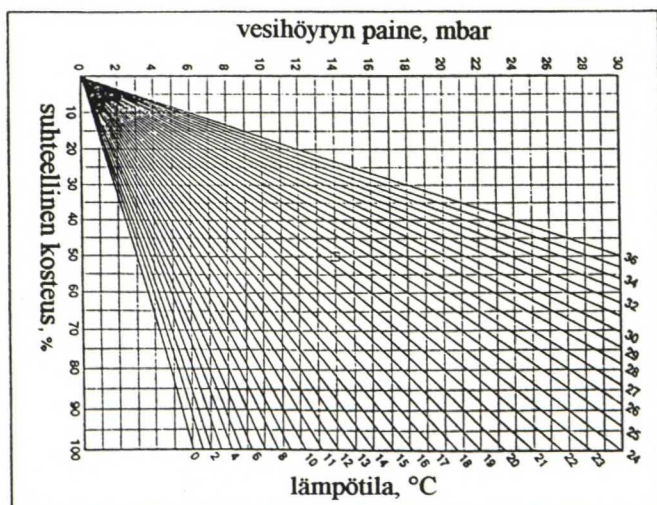
## 5.5 Laminaatin varastoinnin vaikutus

Paperi valmistetaan yleensä 4 - 8 %:n kosteuteen, joka vastaa keskimäärin ilmankosteutta 40 - 80 %. Täten näitä kuivemmassa ja kosteammassa ilmassa paperi käyristyy, jos sen rakenteessa on sellaista toispuolisuutta, jonka seurauksena paperin eri puolet reagoivat eri tavalla kosteuden muutoksiin. /25/

Laminaattirullat ja -arkkipinot on ympäröity käärein kuljetuksen ja varastoinnin ajaksi. Kääreet suojaavat paperia tehokkaasti ilmastoitumisvioletta, sillä ne oleellisesti hidastavat äkillisten ilmastomuutosten vaikutusta paperiin. Kun kääre poistetaan ja tarralaminaatti tuodaan käsittelyhuoneeseen, niin laminaatti käyristyy, jos huoneen olosuhteet eivät vastaa paperin kosteussisältöä. /55/

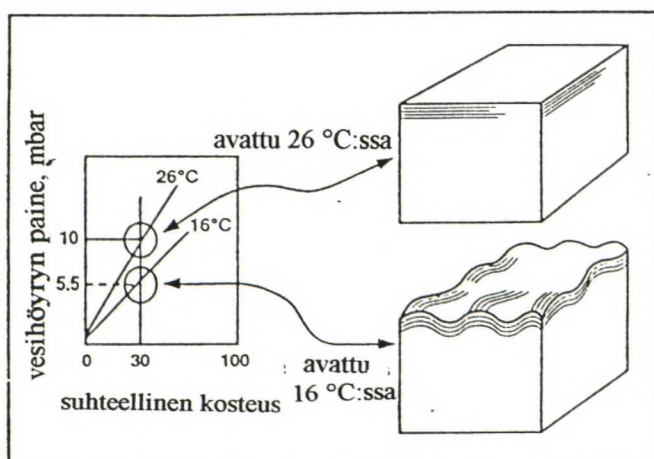
Lämpötilalla on erilainen vaikutus kosteuteen ilmassa ja kosteuteen paperissa. Ilmassa olevat ilma ja vesihöyry vain laajenevat tai kutistuvat yhdessä ideaalikaasulain mukaisesti. Sen sijaan lämpötilan muuttuminen muuttaa veden höyrynpainetta kääreen sisällä olevassa paperissa. Jos paperin vesihöyrynpaine eroaa ilman vesihöyrynpaineesta, niin käyristymistä tapahtuu. Kuvassa 23 on esitetty, miten vesihöyrynpaine riippuu suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta. /55/





Kuva 23. Vesihöyrypaineen riippuvuus kosteudesta ja lämpötilasta /55/.

Seuraava esimerkki valaisee varastoinnin merkitystä tarralaminaatin käyristymiseen. Varastohuoneen lämpötila on 16 °C ja suhteellinen kosteus 55%. Höyrynpaine-kuvaajasta (kuva 23) nähdään ilman vesihöyrypaineen olevan 10 mbar. Kääreen sisällä olevan paperipinon suhteellinen kosteus vastaa ilmankosteutta 30 %, ja se on ollut varastossa niin kauan, että sen lämpötila on 16 °C. Kuvaajasta nähdään, että paperin vesihöyryn paine on vain 5,5 mbar. Jos kääre poistetaan nyt, niin pino imee itseensä kosteutta aiheuttaen kuvan 25 tapaisen muodonmuutoksen. Mutta jos kääre poistetaan huoneessa, jonka lämpötila on nostettu 26 °C:een (tällöin ilmankosteudella 30 % on vesihöyrypaine 10 mbar) ja pinon lämpötila on myös annettu nousta 26 °C:een, pino pysyy suorana (kuva 24).



Kuva 25. Varastoinnin vaikutus paperin käyristymiseen /55/.



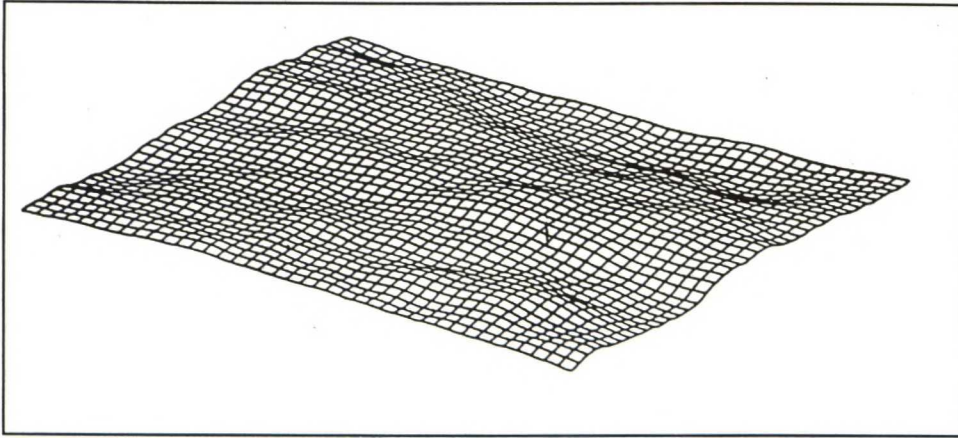
## 6 KÄYRISTYMISEN SIMULOINTI ELEMENTTIMENETELMÄLLÄ

Elementtimenetelmää käytetään yleisesti lujuusopissa rakenteiden kuormituskäyttäytymisen tutkimiseen. Menetelmässä jaetaan rakenne, jonka käyttäytyminen on monimutkaista, pieniin osiin eli elementteihin (kuva 25). Näiden elementtien käyttäytymistä voidaan kuvata jollain yksinkertaisella matemaattisella mallilla. Elementit kytkeytyvät toisiinsa solmupisteissä. /57/

Elementtimenetelmä on tehokas numeerinen menetelmä jatkumoluonteisten mekaanisten ongelmien ratkaisemiseksi. Menetelmässä alkuperäinen jatkuva systeemi jaetaan äärellisen kokoisiksi, diskreeteiksi elementeiksi, joiden muodonmuutokset ratkaisemalla saadaan likimääräinen ratkaisu. Elementtimenetelmästä käytetään usein myös englannin kielistä lyhennettä FEM (Finite Element Method)./57/

Elementtimenetelmän etuna kokeelliseen tutkimukseen on se, että voidaan tarkastella yksittäisten muuttujien vaikutusta lopputuotteen ominaisuuksiin. Kokeellisessa tutkimuksessa on joskus vaikeata muuttaa vain yhtä muuttujaa. Elementtimenetelmä soveltuu hyvin paperin tutkimiseen. Sitä on käytetty mm. paperin vetolujuuden, kupruilun ja käyristymisen mallittamiseen. Simuloimalla voidaan aluksi määrittää ne paperin ominaisuudet, jotka antavat halutun lopputuloksen ja tämän jälkeen kehittää valmistusprosessia siten, että saavutetaan halutut ominaisuudet. /57/

Käyristymisen simuloinnissa oletetaan laminaatin olevan ortotrooppista, jolloin materiaalin ominaisuudet ovat erilaisia kolmessa eri suunnassa (kone-, poikki- ja paksuussuunta). Muita rakennemalleja olisivat isotrooppiset ja anisotrooppiset mallit. Isotrooppisen materiaalin ominaisuudet ovat samanlaisia kaikissa suunnissa ja anisotrooppisen materiaalin ominaisuudet voivat vaihdella kaikissa mahdollisissa suunnissa. Ortotrooppisen mallin matemaattinen käsittely on huomattavasti yksinkertaisempaa kuin anisotrooppisen mallin ja se kuvaa riittävän tarkasti paperin ja muovin rakennetta.



Kuva 25. Paperin jako elementteihin ja mallin avulla ratkaistu paperin kupruilu /57/.

## 6.1 Simuloinnin perusteet

Simulointia varten malli jaetaan elementteihin. Mallille määrätään kuormitus ja reunaehdot sekä ratkaistaan siirtymät. Toinen tapa on määrätä pakkosiirtymät ja ratkaista voimat, jotka aiheuttavat annetun siirtymän. Reunaehdot kuvaavat sitä, missä osissa mallia siirtymiä on rajoitettu. /57/

Elementtimallin käyttöä varten tarvitaan taulukossa 6 esitettäviä tietoja tutkittavasta rakenteesta. Jotta mallin antama ratkaisu olisi oikea, jokaisen osatekijän on oltava oikein. Erityisen tärkeätä oikean ratkaisun saamiseksi on, että materiaalin ominaisuudet, reunaehdot ja kuormitus ovat oikein. /57/

Taulukko 6. Elementtimalliin tarvittavia tietoja /57/.

rakenteen geometria
elementtityyppi (esim. palkki tai laatta)
elementtijako
materiaalin mekaaniset ominaisuudet
reunaehdot
kuormitus (esim. voima tai pakkosiirtymä)

Elementtimallin ratkaisu perustuu energiaperiaatteeseen. Työ koostuu rakenteen muodon muutoksesta seuraavasta sisäisestä työstä ja ulkoisten voimien potentiaalienergiasta yhtälön 2 mukaisesti. /57/

$$W = U + V \quad (2)$$

missä

$W$  työ

$U$  sisäinen työ

$V$  ulkoisten voimien potentiaalienergia

Työ  $W$  minimoidaan, jolloin pienillä työn muutoksilla on voimassa

$$\delta W = \delta U + \delta V = 0 \quad (3)$$

mistä saadaan

$$\delta U = - \delta V \quad (4)$$

Elementtimallin ratkaisu saadaan yhtälöstä 4 pitämällä voimat vakiona ja käsittelemällä siirtymiä, jotka noudattavat jatkuvuus- ja reunaehtoja. /57/

Työtä laskettaessa kunkin elementin siirtymät noudattavat elementille luonteenomaisia muotofunktioita. Nämä ovat yleensä ensimmäisen tai toisen asteen polynomeja, joskus myös kolmannen asteen polynomeja. Ratkaisun on oltava jatkuva elementin rajapinnoilla. /57/

Energiaperiaate johtaa lineaarisessa tapauksessa matriisiyhtälöön 5. Kuormitukseen kuuluu sekä ulkoinen kuorma että mallissa olevat sisäiset jännitykset. Yleensä kuormitus on tunnettu, jolloin ratkaisuna saadaan solmupistesiihtymät. /57/

$$[K] \{d\} = \{F\} \quad (5)$$

missä

$K$  mallin jäykkyysmatriisi

$d$  siirtymät solmupisteissä

$F$  kuormitukset solmupisteissä

Konstitutiivisilla yhtälöillä tarkoitetaan materiaaliin vaikuttavan voiman ja siitä seuraavan muodon muutoksen välistä yhteyttä. Tavallisin konstitutiivinen yhtälö on Hooken laki

$$\sigma = E\varepsilon \quad (6)$$

missä

$\sigma$  jännitys

$E$  kimmokerroin

$\varepsilon$  venymä

Jäykkyysmatriisi  $[K]$  riippuu sekä konstitutiivisesta yhteydestä että mallin geometriasta, ja se saadaan yhtälöstä 7. Integrointi suoritetaan mallin elementtien tilavuuden yli.

$$[K] = \int_V [B]^T [C] [B] dV \quad (7)$$

missä

$B$  kinemaattinen matriisi

$C$  joustomatriisi

Joustomatriisi on kaksiulotteinen versio jännitystensorista. Kinemaattinen matriisi sisältää tiedon mallin geometriasta ja se sitoo toisiinsa venymät  $\varepsilon$  ja todelliset siirtymät  $d$  yhtälön 8 mukaisesti.



$$\{\epsilon\} = [B]\{d\} \quad (8)$$

Kinemaattinen matriisi voidaan muodostaa elementtien muotofunktioiden avulla /57/.

Lujuusopissa tehdään tavallisesti seuraavat yksinkertaistavat oletukset:

1. Siirtymä riippuu lineaarisesti voimasta.
2. Tietynsuuntainen voima synnyttää vain itsensä suuntaisia siirtymiä.
3. Voimien vaikutuspisteet eivät siirry muodon muutoksista eli eri voimien aiheuttamat siirtymät ovat toisistaan riippumattomia ja summattavissa.

Systeemi käyttäytyy lineaarisesti, kun ehdot ovat voimassa. Käytännössä lineaarinen malli on voimassa, kun siirtymät ovat korkeintaan kappaleen paksuuden luokkaa. /57/

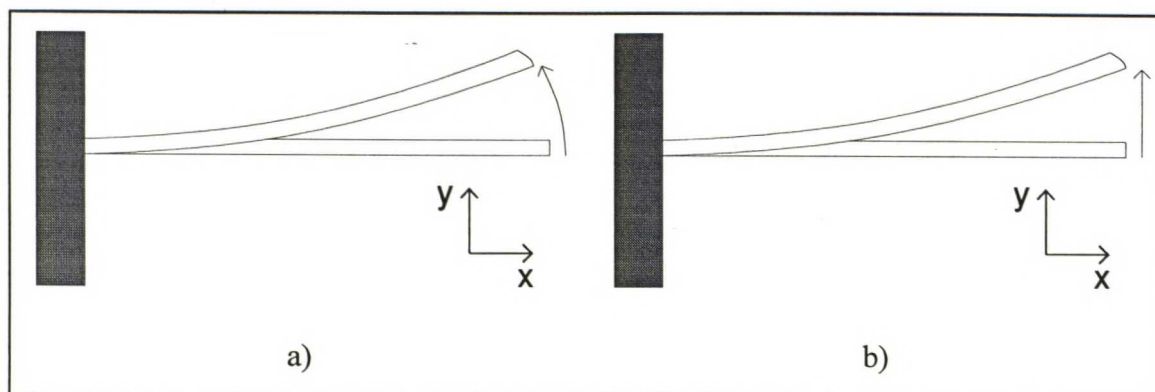
Epälineaarilla alueella ollaan, kun ehdot eivät ole voimassa. Elementtimallissa voi olla kahdenlaista epälineaarisuutta, materiaalin tai geometrista epälineaarisuutta, Materiaalin epälineaarisuudessa Hooken laki ei ole voimassa, eli venymä ei riipu lineaarisesti voimasta. /57/

Geometrisessa epälineaarisuudessa siirtymät ovat niin suuria, että tietyn suuntaiset siirtymät aiheuttavat siirtymiä myös tästä riippumattomissa suunnissa. Kuvassa 26 on esitetty kuinka palkin taipuma eroaa lineaarisessa ja epälinearisessa mallissa. Lineaarinen malli ei huomioi sitä, että palkin pituus on vakio, jolloin y-suuntainen siirtymä aiheuttaa myös x-suuntaisen siirtymän. Lineaarinen malli antaa tällöin virheellisen ratkaisun. /57/

Malli voi olla epälineaarinen myös siten, että siinä esiintyy sekä materiaalin että geometrista epälineaarisuutta. /57/

Epälineaarisen analyysin pahin haittapuoli on sen hitaus, joka johtuu siitä että kuormaa lisätään askelittain ja kullakin askeleella ratkaisu haetaan iteroimalla. Iteroinnin

lopettamisen ehtona on, että edelliseen iteraatiokierrokseen verrattuna siirtymät, voimat tai energia muuttuvat riittävän vähän. /57/



Kuva 26. Palkin taipuminen a) epälineaarisessa ja b) lineaarisessa mallissa /57/.

## 6.2 Elementtimenetelmän soveltaminen laminaatin käyristymiseen

Paperin käyristymisen yhteydessä esiintyy geometrinen epälineaarisuutta, joten käyristymisen tarkka mallittaminen onnistuu ainoastaan epälineaarisilla malleilla. Tarralaminaatti on rakenteeltaan hyvin kerroksellinen. Laminaatti koostuu komponenteista (taustapaperi, silikonit, liima ja etikettimateriaali), joilla on erilaiset ominaisuudet. Muovietikettimateriaalin kimmoiset ominaisuudet eroavat paperin vastaavista eikä sillä ole havaittavaa reagoitua kosteuden muutoksiin. Taustapaperi voi olla itse hyvin kerroksellinen eli sillä voi olla z-suunnassa eroja mm. kuituorientaatioissa ja tiheydessä. Omat erilaiset kerrokset tulevat myös silikonista ja liimasta.

Kerrosmalleissa keskeinen oletus on se, että kerrokset eivät liu'u toistensa suhteen (vastakohtana korttipakkamainen rakenne). Tällöin elementeille tarvitsee vain määritellä homogeenisten kerrosten ominaisuudet ja paksuudet. Ominaisuuksiin kuuluu materiaalmallin lisäksi kuitusuunta, jolloin voidaan mallittaa esimerkiksi kuituorientaatiokulman toispuolisuus. /57/

### 6.3 Materiaaliparametrien määrittäminen käyrityksen simulointia varten

Käyrityksen simulointia varten tarvitsee materiaaleista määrittää kimmokertoimet ja kosteuslaajenemat sekä poikki- että konesuuntaan. Muita tarvittavia kaikissa mahdollisissa suunnissa suureita ovat Poissonin luku ja liukukerroin.

Elementtimenetelmässä kimmokertoimella tarkoitetaan aina kappaleen muodosta ja koosta riippumatonta suuretta, jonka yksikkö on GPa. Kimmokerroin voidaan määrittää joko mekaanisesti, akustisesti tai optisesti. Akustisessa menetelmässä mitataan ultraäänen etenemisnopeutta. Mekaaninen menetelmä on tyypillisesti vetokoe, josta saadaan voima-venymä -käyrä. Optisessa menetelmässä paperia rasitetaan mekaanisesti, mutta venymä määritetään optisesti. /57/

Kosteuslaajenema kuvaa materiaalin mittojen muutosta ympäröivän ilman kosteuden muuttuessa. Kosteuslaajeneman yksikkö on %. Mittaus voidaan suorittaa joko optisesti tai mekaanisesti.

Poissonin luku  $\nu_{ks,ps}$  kuvaa sitä, miten paljon paperi kuroutuu poikkisuunnassa, kun sitä venytetään konesuunnassa

$$\nu_{ks,ps} = \frac{\epsilon_{ps}}{\epsilon_{ks}} . \quad (9)$$

Paperin Poissonin luvulle on saatu eri mittauksissa ja eri mittaustavoilla toisistaan poikkeavia arvoja.

Liukukerroin kuvaa sitä, miten materiaali muuttuu vinoksi leikkausjännitysten alaisuudessa

$$\tau = G \times \Theta \tag{10}$$

- missä
- $\Theta$  liukukulma radiaaneissa
- $G$  liukukerroin
- $\tau$  leikkausjännitys

Liukukertoimet voidaan ortotrooppiselle materiaalille myös määrittää ilman mittaamista yhtälöstä 11.

$$G_{ks,ps} = \frac{(E_{ks} E_{ps})^{1/2}}{2(1 + (v_{ks,ps} v_{ps,ks})^{1/2})} \tag{11}$$

6.4 Kuormitus

Laminaatin käyristymistä simuloitaessa mallia kuormitetaan kosteuden muutoksella. Malliin syötetään paperin kosteuspitoisuuden muutos, jolloin saadaan ratkaistua laminaatin käyristyminen taustapaperin kosteuslaajeneman avulla (yhtälö 12). Laminaatin käyristymistä mallitettaessa voidaan taustapaperin eri kerroksiin syöttää erilaiset kosteuslaajenemiskertoimet, jolloin samalla kosteuskuormituksella voidaan simuloida käyristymisen muuttumista.

$$\epsilon = \beta \, dH \tag{12}$$

- missä
- $\epsilon$  venymä
- $\beta$  kosteuslaajenemiskerroin
- $dH$  kosteuden muutos



## 7 TARRALAMINAATIN HÖYRYKOSTUTUS

Paperin kostutuksella voidaan muuttaa paperin kosteuspitoisuutta, jolloin mm. paperin käyristymistä voidaan hallita. Paperin kostutukseen on käytettävissä monia menetelmiä, kuten suutin-, harja-, tela- ja höyrykostutus. /39/

Höyrykostutus voi tapahtua johtamalla paperiraina kammion läpi, jossa vesihöyryn osapaine on korkea, puhaltamalla tulistettua vesihöyryä ohikulkevaa rainaa vasten tai imemällä vesihöyry rainan läpi. /39/

Paperin höyrykostutuksessa kosteus tuodaan paperin höyrynä, joka sitten kondensoituu paperin pinnalle ja huokosrakenteeseen paperin lämpötilan laskiessa kastepisteen alapuolelle. /39,58/

Kääreen tai rullan sisällä olevan paperin kuivuminen voi kestää jopa vuosia /59/, joten paperin kosteuspitoisuuden nostolla aikaansaatu vaikutus säilyy paperin jatkojalostukseen asti.

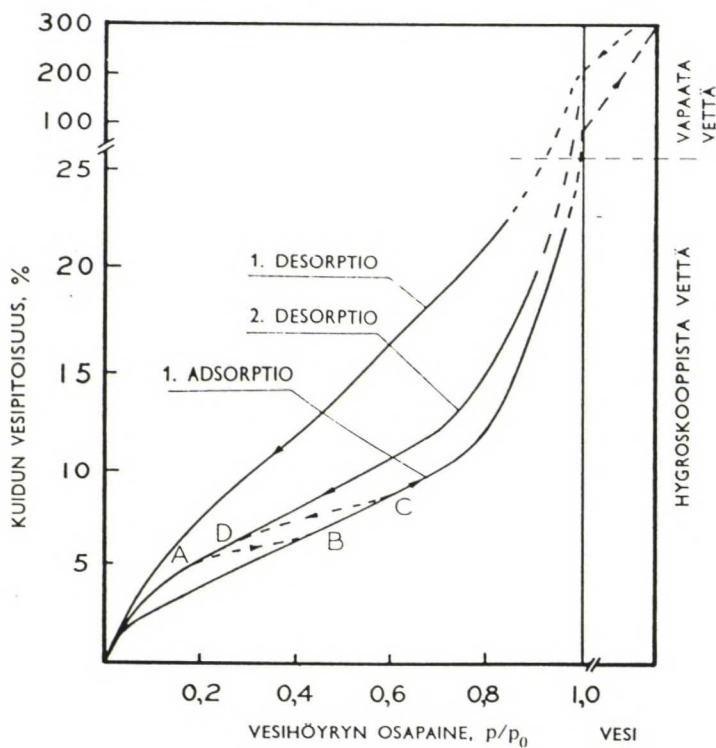
### 7.1 Paperi vettä vastaanottavana elementtinä

#### 7.1.1 Kuidun sorptio-ominaisuudet

Paperi on hygroskooppinen aine eli paperissa oleva kosteus pyrkii tasapainotilaan vallitsevan ilman kosteuden kanssa. Ilman kosteuden noustessa paperi absorboi vettä kunnes sen vesipitoisuus on tasapainossa ympäröivän ilman kosteuden kanssa. Tämä kuidun tasapainokosteuden arvo riippuu kuidun saamasta kemiallisesta tai fysikaalisesta käsittelystä, kosteushistoriasta ja lämpötilasta. /39, 60/.

Sorptiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa vieras aine kerääntyy toisen aineen pintaan, joko adsorptio-, absorptio tai molempien mekanismien mukaisesti. Adsorptiossa vieras aine kuten kaasu tai neste kerääntyy toisen aineen pinnalle, mutta absorptiossa se tunkeutuu toisen aineen sisään. Desorptiossa vieras aine poistuu toisen aineen pinnalta. /61/

Sellukuidun vesihöyryn sorptioisotermi kuvaa sitä vesimäärää, joka tietyssä lämpötilassa on kiinnittynyt aineen pintaan kussakin suhteellisessa kosteudessa. Tyypillinen sorptioisotermi on esitetty kuvassa 27. Kuvasta voidaan havaita, että kuidun vesipitoisuus on desorptiossa suurempi kuin adsorptiossa. Tätä kutsutaan sorptiohystereesiksi.



Kuva 27. Sorptioisotermi vesihöyryn sorptiossa sellukuituun /61/.

Puukuidun vesiadsorptio tapahtuu kosteassa ilmassa kahdella erilaisella mekanismilla: varsinaisella adsorptiolla ja kapillaarikondensaatiolla. Lisäksi kuitu voi sitoa vapaata vettä, jos se joutuu kosketuksiin nestemäisen veden kanssa. /39/

Seuraavassa tarkastellaan selluloosakuidun vesipitoisuuden kehitystä, lähtien täysin kuivasta kuidusta ja päätyen täysin vedellä kyllästettyyn kuituun.

Vesihöyryn osapaineen noustessa alkaa vesimolekyylejä adsorboitua selluloosan kiteisen osan pinnalle ja amorfisten osien sisään. Aluksi vesi muodostaa monomolekulaarisen kerroksen kuidun seinämään. Jos monomolekulaarinen kerros on tasaisesti jakautunut selluloosamolekyylien pinnalle, kuidun vesipitoisuus on 3 %. Ilman suhteellisen kosteuden kasvaessa adsorptio jatkuu polymolekulaarisena. Tämä varsinainen adsorptio turvottaa kuituja voimakkaasti, etenkin kuidun poikkisuunnassa. /22, 61/

Polymolekylaarinen adsorptio alkaa noin 20 % suhteellisessa kosteudessa ja jatkuu noin 95 % suhteelliseen kosteuteen eli kuitujen kyllästyspisteeseen /22/. Tällöin kuidun vesipitoisuus on 20 - 30 % /39/.

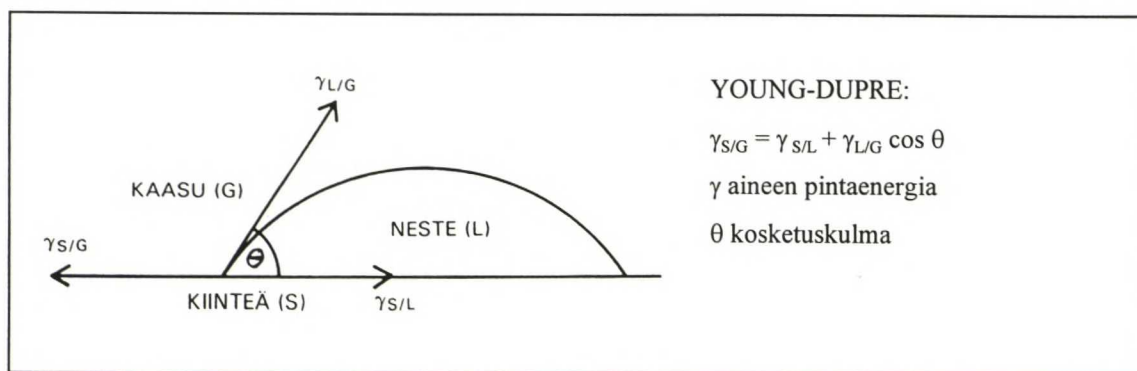
Kapillaarivesi on vettä, joka täyttää erisuuruisia onkaloita kuituseinämässä vesikontaktin jälkeen kapillaari-ilmiöön perustuen suuressa ilman suhteellisessa kosteudessa. Kapillaarivesi muodostuu, kun kuituseinämän vesi ei pääse normaalisti ulos desorptiossa tai kun huokoset ovat yhtäkkiä täyttyneet kondensaation seurauksena suurilla vesihöyryn osapaineilla. /39/

Vapaata vettä esiintyy kuidussa kyllästyspisteen yläpuolella. Vapaa vesi ei ole sitoutunut kuituun, vaan pysyy kuidussa kapillaarivoimien vaikutuksesta /60/. Vapaata vettä voi olla kuidussa vasta, kun kuituun on sitoutunut vähintään 2-5 vesimolekyylikerrosta /61/.

### 7.1.2 Kuitupinnan kastuminen

Nesteen sisällä olevat molekyylit vetävät puoleensa pinnalla olevia molekyylejä ja pyrkivät vetämään niitä sisäänpäin. Tämä aiheuttaa nesteen pinnassa jännityksen, joka vetää pintaa kokoon. Jos nesteeseen ei vaikuta ulkoisia voimia, niin se pyrkii pallon muotoiseksi, koska pallon pinta on pienin pinta, joka voi ympäröidä tietyn tilavuuden. /39/

Vapaan nestepinnan ja kiinteän pinnan kohdatessa nämä rajapinnat leikkaavat toisensa määrättyssä kulmassa  $\theta$ , joka riippuu kyseessä olevasta nesteestä ja kiinteästä aineesta Young-Dupren yhtälön mukaan (kuva 28). /2,63/



Kuva 28. Nesteen ja kiinteän aineen rajapinnan muodostuminen /63/.

Maksimaalinen kastuminen saavutetaan, kun kosketuskulma  $\theta$  on  $0^\circ$ , osittainen kastuminen, kun  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  ja pinta hylkii vettä, kun  $\theta > 90^\circ$ .

Paperin pinnan karheus vaikuttaa paperin kastumiseen eli kosketuskulmaan  $\theta$ . Kun neste kastelee paperin pinnan ( $\theta < 90^\circ$ ) karheuden suureneminen lisää paperin kastuvuutta. Jos paperi hylkii nestettä ( $\theta > 90^\circ$ ), karheuden suureneminen lisää hylkimisvaikutusta. /64/

Vesiselluloosasysteemin kontaktikulmat vaihtelevat paperin kosteuspitoisuuden mukaan. Paperin, joka on ilmastoitu 0 % suhteellisessa kosteudessa ja veden välinen



kontaktikulma on  $33^\circ$ . Suhteellisen kosteuden ollessa 100 % on kontaktikulma  $18^\circ$ . Paperin pinnan ollessa valmiiksi vedellä kasteltu on kontaktikulma  $0^\circ$ . /39/

### 7.1.3 Veden penetraatio paperiin

Veden penetroituminen paperiin tapahtuu kahden mekanismin yhdistelmänä: pinnan kastumisena ja kapillaarien aiheuttamana kastumisena. Veden nousu kapillaareihin on perimmäinen syy, miksi kuituverkosto imee vettä. Vesi siirtyy paperiin kapillaari-imun vaikutuksesta, ja liikkeen nopeutta säätelee veden viskositeetti ja kontaktikulma. /39/

Veden tunkeutumista paperin kapillaareihin voidaan tarkastella Lucas-Washburnin yhtälön avulla /39,63/

$$L^2 = \frac{r^2 t}{4\eta} \left( \frac{2\gamma \cos\theta}{r} + p \right) \quad . \quad (13)$$

missä

L ajassa t tapahtunut nestepenetraation matka

r kapillaarisäde

$\eta$  nesteen viskositeetti

$\theta$  kontaktikulma

$\gamma$  nesteen pintajännitys

p nesteen paine

Paperin rakenteen kannalta Lucas-Washburnin yhtälö on voimakkaasti yksinkertaistettu. Yhtälö pätee vain yhteen tasaiseen ja pyöreään kapillaariin ja vain silloin, kun kosketuskulma on terävä ja virtaus laminaarista. Todellisuudessa paperin huokoskokojakaumaa on vaikea määrittää, ja lisäksi vesi turvottaa kuituja aiheuttaen paperin huokoskoon muuttumisen. /39, 63/

Yhtälöstä 13 voidaan kuitenkin päätellä, että kosketuskulman kasvu ja huokossäteen pieneneminen vähentävät nesteen tunkeutumisnopeutta.

### 7.1.4 Paperin kosteuden vastaanottokykyyn vaikuttavia tekijöitä

Eri kuitulajien vesiadsorptio on erilainen. Tämä johtuu selluloosan kiteisen ja amorfisen aineen suhteesta, kuitukomponenttien vesiaffiniteetista ja sitoutumisesta kuituseinään sekä kuitukomponenttien keskinäisestä sitoutumisasteesta /61/. Taulukossa 7 on esitetty eräiden papereiden tasapainovesipitoisuuksia eri vesihöyryn osapaineissa.

Taulukko 7. Eräiden papereiden tasapainovesipitoisuus vesihöyryn adsorptiossa /61/.

paperi	käsittely	lämpötila	tasapainovesipitoisuus (%) vesihöyryn osapaineissa			
			0,3	0,5	0,75	0,9
sanomalehtipaperi		25 °C	7,0	10,0	14,0	18,0
kevyt painopaperi		25 °C	5,5	7,0	11,0	16,0
offset-painopaperi		25 °C	5,1	6,5	10,0	14,0
laboratorioarkki	jauhamaton 670 CSF	20 °C	5,0	7,8	11,8	18,0
laboratorioarkki	jauhettu 54 CSF	20 °C	5,1	8,0	12,1	18,3

Taulukosta 7 voidaan havaita, että massan koostumuksella on suuri vaikutus paperin tasapainovesipitoisuuteen tietyssä ilmastossa. Mekaanisista massaa sisältävät paperit imevät itseensä vähemmän kosteutta kuin kemiallisesta massasta valmistetut. Jauhatuksen vaikutus paperin kosteuden adsorptioon on vähäinen.

Paperin käsittelyt, kuten päällystys, pinta- ja massaliimaus sekä kalanterointi vaikuttavat paperin veden vastaanottokykyyn. Ne yleensä kasvattavat pinnan ja veden välistä kosketuskulmaa, jolloin kastuminen hidastuu. Pintakäsittelyt tiivistävät paperin pinnan huokosrakennetta, jolloin veden penetraatio hidastuu. /39/

Paperin lämpötila vaikuttaa paperiin adsorpoituvan kosteuden määrään. Koska adsorptio on eksoterminen eli lämpöä kehittävä reaktio, niin paperin tasapainovesipitoisuus pienenee lämpötilan noustessa. Erään lähteen /65/ mukaan lämpötilan nosto ( $50\text{ °C} \rightarrow 90\text{ °C}$ ) pienensi tasapainovesipitoisuutta noin 2 %, kun ilman suhteellinen kosteus oli 50 % RH.

Kuten edellä on jo todettu, paperin ja veden välinen kosketuskulma pienenee eli paperin kastuvuus suurenee, kun paperin kosteus kasvaa. Paperin kostuminen on siis lähtökosteudesta riippuva ilmiö. Kuiva paperi adsorpoi huonosti vettä, kunnes kosteuspitoisuus on noussut jonkin verran ja kuidut ovat kosteudelle vastaanottavaisemmassa tilassa. Tästä eteenpäin sorptio tapahtuu nopeasti lähelle tasapainotilaa, jolloin sorptio luonnollisesti hidastuu. /39/

Paperin tasapainovesipitoisuuteen vaikuttaa lämpötilan ja ympäristön suhteellisen kosteuden lisäksi se, miten ympäristön kosteutta muutetaan. Tasapainovesipitoisuus on suurempi, jos tasapainotilaa lähestytään integroidulla (yhdellä kertaa tapahtuvalla) suhteellisen kosteuden muutoksella kuin intervalliansorptio (askelittain tapahtuneen) jälkeen. Ero on noin 10 %. /61/

## 7.2 Laminointiprosessin simulointi

Simuloimalla paperin kostutusta ja kuivatusta voidaan tarkastella miten laminaatin kosteus muuttuu laminointiprosessin aikana. Simuloimalla voidaan etsiä ne olosuhteet ja toimintatavat, joilla saadaan aikaan halutut taustapaperin ja tarraliiman kosteudet.

Kostutuksen simulointi perustuu aine- ja energiatasapainoihin sekä paperin sisällä että paperin ja ympäröivän ilman välillä. Kostutuksen simulointia varten ei juuriakaan ole olemassa valmista kirjallista materiaalia, mutta käyttämällä hyväksi paperin kuivatusta

varten kehitettyjä matemaattisia malleja ja yleisiä kuivatusteorioita voidaan paperin kostutusta simuloida.

Simulonnissa täytyy tehdä joitakin yksinkertaistavia oletuksia: lämpö- ja massavirtaukset tapahtuvat vain paperin paksuussuunnassa, paperi on makroskooppisesti homogeenista sekä painovoima, massan hitaus ja muodonmuutostyö ovat merkityksettömiä /58/.

### 7.2.1 Perusyhtälöt kostutuksen simulointiin

Kosteuden siirtymisen teoriaa on käsitelty monissa lähteissä /mm. 58,62,66,67/, joten seuraavassa tyydytään esittelemään tärkeimmät yhtälöt, jotka liittyvät paperin kostumiseen.

Kosteuden siirtyminen paperissa on määritelty yhtälön 14 mukaisesti, jossa kosteuden siirtyminen sisältää sekä kapillaari-imun että diffuusion.

$$\rho_1 \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_2}{v_2} \frac{\partial p_2}{\partial x} + \epsilon_b \times \frac{M_3}{RT} \times D_{34} \times \frac{\partial p_3}{\partial x} \right) \quad (14)$$

missä

$\rho$ osittaistiheys (kg/m <sup>3</sup> )	M veden moolimassa (g/mol)
u kosteussuhde (kg H <sub>2</sub> O / kg ka)	R kaasuvakio (J/kg K)
t aika (s)	T lämpötila (T)
x paksuus (m)	D diffuusiokerroin (m <sup>2</sup> /s)
k veden johtavuuskerroin (m)	alaindeksit
v kinemaattinen viskositeetti (m <sup>2</sup> /s)	1 kiinteä faasi
p paine (Pa)	2 veden nestefaasi
$\epsilon$ vastustuskerroin (-)	3 vesihöyry
	4 kuiva ilma



Vastaavasti lämmön siirtyminen on määritelty

$$\rho \times c_p \frac{\partial T}{\partial t} = l \times \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_b \times \frac{M_3}{RT} \times D_{34} \times \frac{\partial p_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (15)$$

missä

$c_p$  ominaislämpö (kJ/kgK)

$l$  haihdutuksen latenttilämpö (kJ/kg)

Lämmön siirtymistä paperin ja ympäröivän ilman välisessä rajakerroksessa voidaan kuvata yhtälöllä

$$q = \alpha (T_a - T_p) \quad (16)$$

missä

$q$  lämpövuoto

$\alpha$  konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$a$  alaindeksi

$p$  kuiva ilma

$p$  paperi

Vastaavasti kosteuden siirtymistä paperin ja ympäröivän ilman välillä voidaan kuvata yhtälöllä

$$m = k M_3 \ln \frac{P_a}{P_{ap}} \quad (17)$$

missä

$m$  massavirtaus (kg/s)

$k$  massansiirtokerroin (kmol/m<sup>2</sup>)

alaindeksi

$a_p$  kuiva ilma paperin sisällä

Yhtälöstä 4 nähdään, että jos paperin sisällä höyryn osapaine on pienempi kuin ympäröivän ilman vesihöyryn osapaine, niin paperi kostuu, päinvastaisessa tapauksessa paperi kuivuu.

Paperin sisällä olevan höyryn osapaine on paperin kosteuspitoisuuden ja lämpötilan funktio. Höyryn osapaine paperin sisällä on määritelty /68/

$$p_{v,p}(T,z) = \Phi(T,z) p_v'(T) \quad (18)$$

missä  $p_v'(T)$  on kylläisen vesihöyryn paine Antoine'n yhtälöstä

$$p_v'(T) = e^{11,8054 - (3891,4 / (230 + T))} \quad (19)$$

Paperin kosteus on riippuvainen ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta. Ympäröivän ilman ja paperin sisäisen kosteuden välillä vallitsee tasapaino yhtälön 20 mukainen tasapaino. Yhtälössä 20 olevat kertoimet on määritettävä jokaiselle paperilaadulle erikseen.

$$\Phi(T,z) = 1 - e^{-m z^n} \quad (20)$$

Jos paperin kostutus ei tapahdu suljetussa kammiossa, niin voidaan olettaa kuivan ilman osapaineen ilmassa olevan saman kuin vallitsevan ilmanpaineen eli noin 1 bar. Kuivan ilman osapaine paperissa on ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktio yhtälön 21 mukaisesti /69/.

$$p_{ap} = 1 - \ln [\Phi(T,z)] \times p_v'(T) \quad (21)$$

Käyttämällä yhtälöitä 14-21 voidaan määrittää paperin kosteuspitoisuus eri olosuhteissa. Differentiaaliyhtälöiden 14 ja 15 ratkaisemiseksi ne voidaan muuttaa differenssimuotoon, jolloin ne voidaan ratkaista askel kerrallaan.

### 7.2.2 Coatman-ohjelman käyttö simuloinnissa

Coatman-ohjelma Windows sovellus, joka on kehitetty VTT Energiassa päällysteen kuivatuksen simulointia varten. Ohjelmalle annetaan simulointia varten paperin ja päällysteen tärkeimmät ominaisuudet, kuten neliömassa, kuiva-ainepitoisuus, tiheys, lämmön johtavuus ja ominaislämpökapasiteetti. Ohjelmaa käytetään tässä työssä tarralaminaatin taustapaperin kostutuksen simulointiin sekä tarraliiman kuivatuksen simulointiin.

Ohjelmassa voidaan käyttää todellisen koneen konfiguraatiota, sillä kuivattimien tehot ja muut ominaisuudet voidaan syöttää. Coatman-ohjelmassa voidaan käyttää kuivatuksessa infra-, leiju- tai sylinterikuivatusta. Tätä työtä varten Coatman-ohjelmaan rakennettiin höyrylaatikko, jolla simuloidaan laminaatin taustapaperin höyrykostutusta.

Paperi ja liima jaetaan simuloinnissa paksuussuunnassa kerroksiin, joiden lämpötilat ja kosteudet määritetään joka aika-askeleella. Simuloinnin tulokset näytetään sekä graafisesti että tekstimuodossa erillisissä ikkunoissa.

Ohjelma vaatii käytetyltä mikrotietokoneelta suhteellisen paljon tehoa, koska aika-askeleen pituus on 0,05-0,00001 sekuntia ja simuloitavan kuivatustapahtuman todellinen kesto voi hitaalla laminointikoneella olla 20-30 sekuntia.

## 8 KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO

Tarralaminaatin käyristyminen voi johtua taustapaperin ja etikettimateriaalin ominaisuuksista, paperin kosteuspitoisuudesta ja valmistuksen jälkeisestä käsittelystä.

Taustapaperin mittapysyvyyden vaikutus näkyy selvästi muovietikellisen laminaatin käyristymisessä. Kosteuden muutos muuttaa ainoastaan taustapaperin mittoja, jolloin laminaatti käyristyy. Näin tapahtuu vaikka taustapaperi ei itse käyristyisikään, vaan pelkästään muuttaisi mittojaan. Käyristyminen on sitä pienempää, mitä parempi mittapysyvyys taustapaperilla on.

Massan jauhatuksen määrä vaikuttaa paperin mittapysyvyyteen. Jauhatuksen lisääminen lisää kuitujen välisiä sidoksia ja yksittäisen sidoksen pinta-ala kasvaa. Yksittäisten kuitujen laajeneminen tai kutistuminen vaikuttaa sitä enemmän koko paperin mittojen muuttumiseen, mitä enemmän paperissa on sidoksia. Kuituorientaation vaikutus paperin tietyn suuntaiseen mittapysyvyyteen on selvä. Paperin konesuuntaisen kuituorientaation kasvaminen heikentää poikkisuuntaista mittapysyvyyttä, koska kuidulla itsellään on suurempi kosteuslaajeneminen poikki- kuin pituussuunnassa. Paperin mittapysyvyyteen voidaan vaikuttaa muuttamalla paperin kutistumaa kuivatuksen aikana. Mitä suurempi on paperin kutistuma kuivatuksen aikana, sitä suuremmaksi muodostuu kosteuslaajenema. Poikkisuuntaista kuivatuskutistumaa voidaan pienentää kiristämällä kuivatuskudoksia ja nopeuttamalla kuivatusta.

Taustapaperin oma käyristyminen voi johtua toispuolisesta kuituorientaatiosta, hieno- ja täyteainejakaumasta, tiheyseroista, sisäisistä jännityksistä ja kosteuden erilaisesta imeytymisestä eri pinnoilta. Muovietikellisellä tarralaminaatilla taustapaperin oma käyristyminen ei ole niin merkittävää koko laminaatin käyristymisen kannalta kuin paperietiketillisellä laminaatilla, koska muovietiketti ei muuta mittojaan ilmankosteuden vaihdellessa. Taustapaperin käyristymisen hallinnalla voidaan kuitenkin hieman vaikuttaa



laminaatin käyristymiseen. Taustapaperin oman käyristymistäipumuksen tulisi olla eri suuntaan kuin laminaatin.

Taustapaperin mittapysyvyyteen ja käyristymiseen vaikuttaa paperin kosteuspitoisuus. Jos kosteuspitoisuus eroaa paperin tasapainokosteuspitoisuudesta käyttöolosuhteissa, niin paperin kosteuspitoisuus alkaa muuttua. Kosteuspitoisuuden muuttuminen muuttaa paperin mittoja, jolloin laminaatti käyristyy. Laminaattia pitäisi säilyttää tai se ainakin pitäisi avata kääreistä sellaisessa ilmankosteudessa, joka ei poikkea paperin kosteudesta. Jos myös sekä paperin että ilman lämpötila on sama, niin laminaatti ei käyristy. Kääreistä poistaminen olisi hyvä tehdä juuri ennen käyttöä.

## KOKEELLINEN OSA

### 9 NÄYTTEIDEN KÄSITTELY JA ANALYSOINTI

#### 9.1 Kokeellisen osan tavoitteet

Kokeellisessa osan tavoitteena oli tutkia miten tarralaminaatin materiaalien ominaisuudet ja laminointiprosessi vaikuttavat tarralaminaatin kosteuskäyristymiseen.

Laminaatin käyristymistä simuloitiin matemaattisella mallilla ja simuloinnin tuloksia verrattiin todellisiin käyristymiin. Simulointia varten laminaatin materiaaliominaisuudet määritettiin mahdollisimman tarkasti, jotta voitiin muodostaa toimiva käyristymismalli erilaisille tarralaminaateille. Kun käyristymismalli on verifioitu todellisten käyristymien kanssa, niin voidaan muuttaa esimerkiksi taustapaperin ominaisuuksia ja tarkastella niiden vaikutusta laminaatin käyristymiseen.

Laminointiprosessista tutkittiin tarraliiman kuivatuksen ja taustapaperin kostutuksen vaikutusta laminaatin käyristymiseen. Apuna käytettiin Coatman-ohjelmaa. Simuloimalla haettiin ne laminointiprosessin olosuhteet, joilla valmistettu tarralaminaatti ei käyristy myöhemmissä käyttökohteissa.

#### 9.2 Materiaalit

Mittauksissa käytettiin viittä eri taustapaperia, joista jatkossa käytetään tunnuksia A, B, C, D ja E. Näytteet A, B ja D olivat superkalanteroitua glassiinipaperia sekä C ja E pigmenttipäällystettyä sellupaperia. Näytteiden koko oli A4.

Näytteitä prosessoitiin ennen mittauksia taulukon 8 mukaisesti.

Taulukko 8. Taustapapereiden prosessointi.

prosessointikoodi	prosessointi	tarkempi kuvaus
1	raakapaperi	paperi suoraan tehtaalta
2	kuivattu	kuivattu pilotkoneella 2×infra, 120 °C höyryhuuva, 220 °C maakaasuhuuva, 40 m/min
3	silikonoitu	silikonoitu ja kuivattu pilotkoneella* 2×infra, 120 °C höyryhuuva, 220 °C maakaasuhuuva, 40 m/min

\* poikkeuksena tapaus E3, jolloin olosuhteet olivat 3×infra, 120 °C höyryhuuva, 250 °C maakaasuhuuva, 40 m/min.

Taustapapereita säilytettiin vakio-olosuhdehuoneessa ( $t = 23 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $46 \pm 1 \text{ \% RH}$ ) sekä normaalissa varastohuoneessa ( $t = 23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 20 - 32 % RH).

Muoveina käytettiin polypropeenia (PP) sekä polyeteeniä puhallussuhteilla 1,5 (PE15) ja 2,5 (PE25).

Käyritysmismallin viritystä varten valmistettiin käsin muovietikellisiä laminaatteja. Liimapaketista siirrettiin liima taustapaperille, jonka päälle asetettiin muovikalvo. Muovikalvoa tasoiteltiin ilmakuplien poistamiseksi erittäin varovasti, jottei se venyisi. Laminaatteja valmistettiin polypropeenista ja taustapapereista A-E prosessoinneilla 1 ja 2. Silikonoitua paperia (koodi 3) ei voitu käyttää, koska liimapaketin liima ei tarttunut siihen.

Laminointiprosessin vaikutuksen selvittämiseksi suoritettiin koeajoja sekä koe- että tuotantokoneella. Mittaustietoja käytettiin myös Coatman-ohjelman viritykseen. Koeajoissa käytettiin taustapapereita B ja C sekä muoveista polypropeenia.

### 9.3 Suoritetut mittaukset

Taustapapereista ja muoveista suoritettiin taulukon 9 mukaiset mittaukset.

Taulukko 9. Suoritetut mittaukset

Mittaus	Menetelmän kuvaus
Neliömassa	SCAN-P 6:75
Kosteuspitoisuus	SCAN-P 4:63
Paksuus	SCAN-P 7:75
Kimmomoduli	SCAN-P 38:80
Kosteuslaajenema	SCAN-P 28:88
Käyristyminen	Liite 1
Kosteusisotermi	Liite 2

Varsinaiset mittaustulokset on esitetty liitteissä 3,4 ja 5.



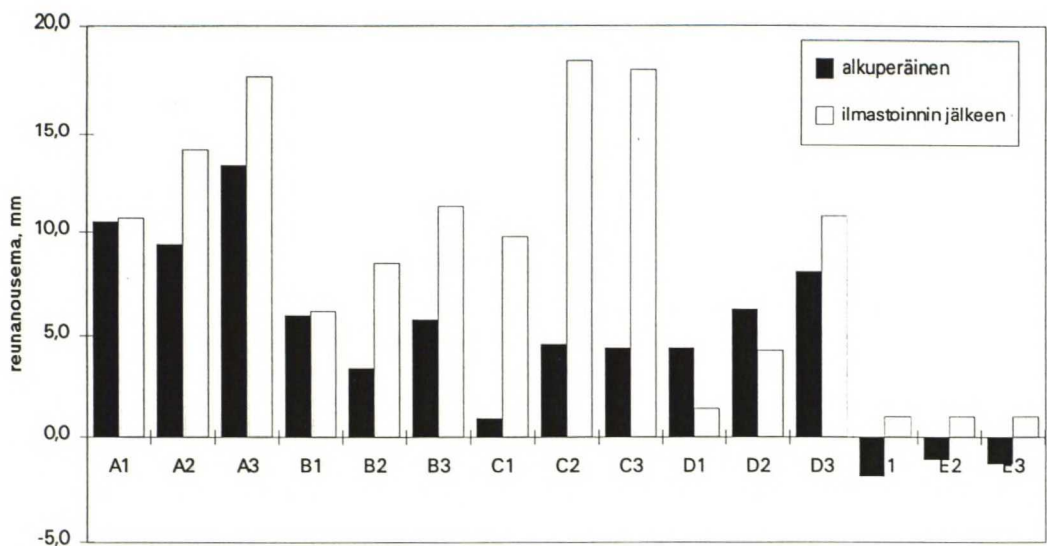
## 10 TARRALAMINAATIN MATERIAALIOMINAISUUKSIEN VAIKUTUS KÄYRISTYMISEEN

Tässä luvussa esitetään tarralaminaatin materiaaliominaisuuksien vaikutusta laminaatin käyristymiseen. Kaikissa käyristymismittauksissa havaittiin käyristymisakselin olevan muutaman asteen tarkkuudella konesuuntaan eli käyristymisen tapahtui poikkisuunnassa. Tästä johtuen työn kokeellisessa osassa kiinnitetään erityistä huomiota vain materiaalien poikkisuuntaisiin ominaisuuksiin. Mittaustulokset 95 % luottamusväleineen on esitetty liitteessä 3.

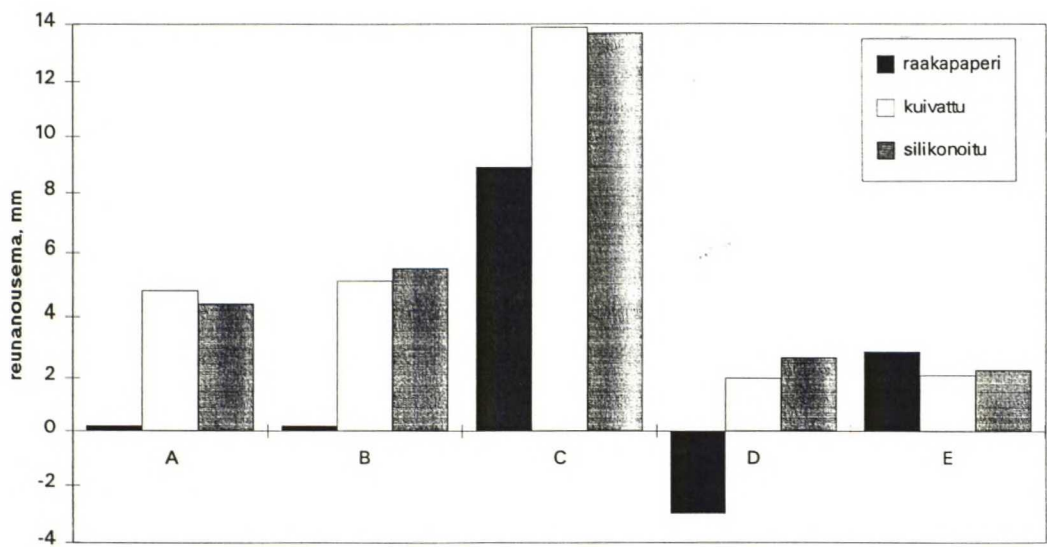
### 10.1 Taustapaperien käyristyminen

Taustapapereiden käyristyminen testattiin sekä uunikäyristymän että kosteuskäyristymän avulla. Osa taustapapereista oli selvästi käyriä jo ennen uunitus- tai kosteuskäsittelyä (kuva 29). Tämä viittaa siihen, että paperin z-suunnassa on epätasainen kuituorientaatio tai kuivatusjännitykset ovat jakaantuneet epätasaisesti.

Taustapapereiden reagointi kosteuden lisääntymiseen ja sitä kautta kosteuskäyristymiseen vaihteli eri paperilajeilla. Kosteuskäyristymään vaikutti huomattavasti paperin aikaisempi kuivatus. Kuivattu taustapaperi käyristyi enemmän viettäessä kostempaan ympäristöön kuin raakapaperi (kuva 30). Tähän on syynä paperikoneella ja superkalanterilla syntyneiden kuivatusjännitysten osittainen laukeaminen ja alhaisempi kosteustaso. Silikoinnin vaikutus käyristymään on hyvin pieni.



Kuva 29. Taustapapereiden valmistuksen jälkeinen käyryys vs. ilmastoinnin jälkeinen käyryys. Positiiviset arvot kohti silikonoitavaa pintaa.

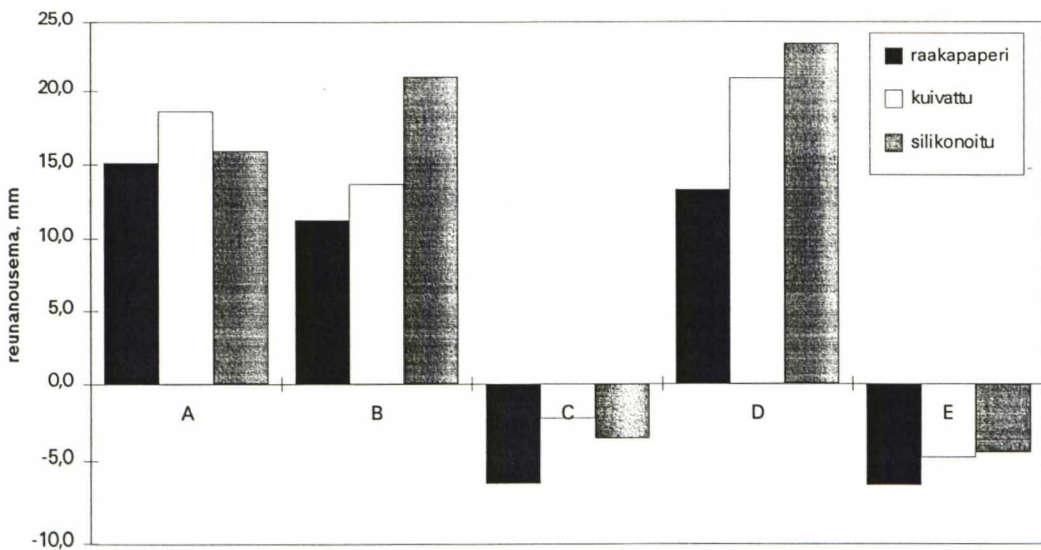


Kuva 30. Taustapapereiden kosteuskäyritymä eri käsittelyillä. Positiiviset arvot kohti silikonoitavaa pintaa. (ilmankosteus 21 % RH → 46 % RH)

Kaikki taustapaperit käyristyivät uunikäsittelyn aikana (kuva 31). Käyritymät olivat suurempia kuin kosteuden lisäämisellä aiheutetut.

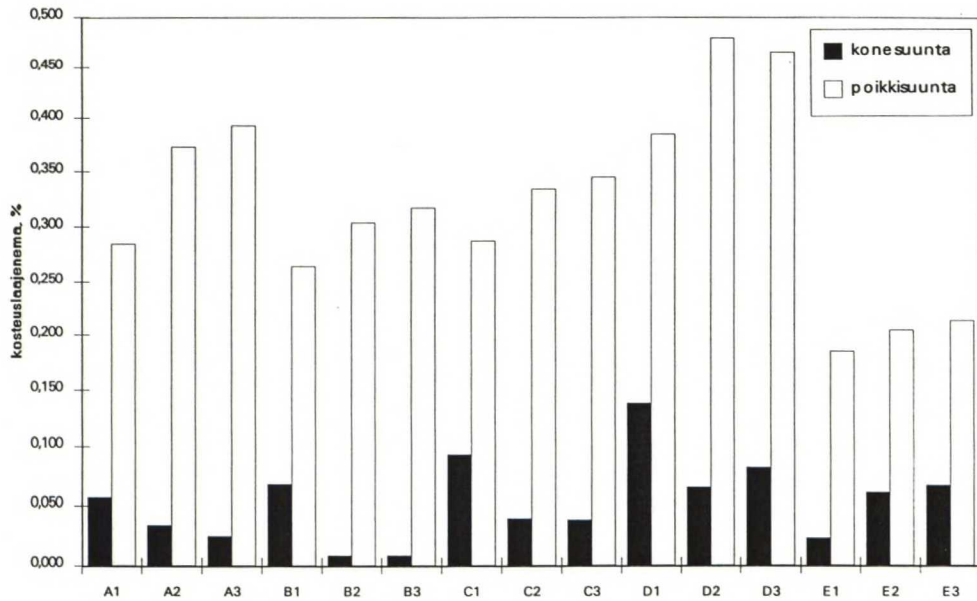
Uunikäsittelyn jälkeen mitattujen käyritymien avulla voidaan arvioida paperin jännitystiloja. Suoritetu uunikäsittely antaa kuvan siitä, kuinka paljon paperista laukeaa jännityksiä. Voidaan olettaa, että mitä enemmän paperissa on jännityksiä, sitä enemmän niitä voidaan siitä laukaista.

Paperit C ja E käyristyivät eri suuntaan eli poispäin silikonoitavasta puolesta kuin paperit A, B ja D. Tämä johtuu siitä, että papereiden kuivatusjännitykset ovat jakaantuneet erilaila paperinvalmistusvaiheessa. Syynä tähän on paperin eri puolien erilainen kuivumisnopeus ja superkalanteroinnin aiheuttamat muutokset paperissa (A, B ja D). Jos käyristyminen johtuisi ainoastaan kosteuden muutoksista, kosteus- ja uunikäyristymiset olisivat eri suuntiin.



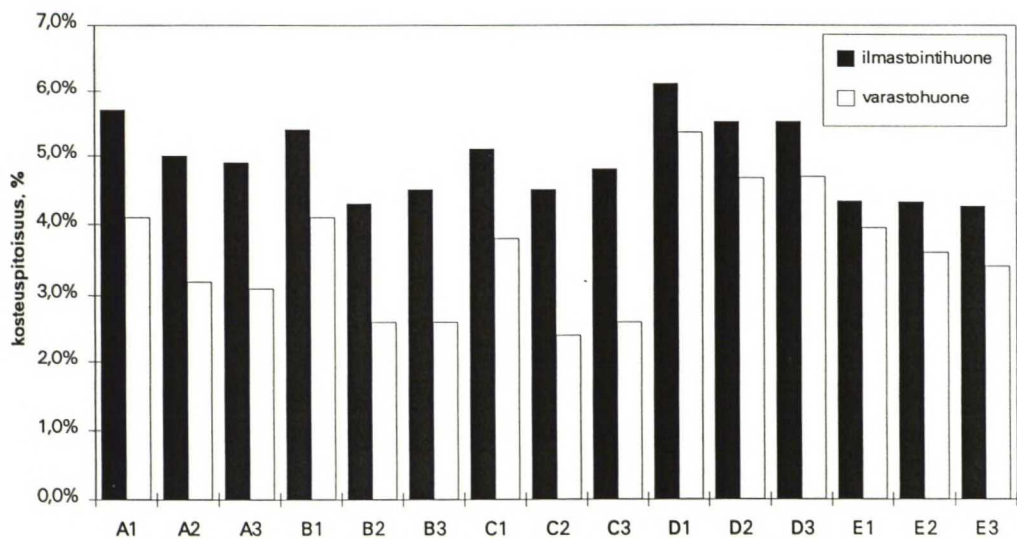
Kuva 31. Taustapapereiden uunikäyristymä eri käsittelyillä. Positiiviset arvot kohti silikonoitavaa pintaa.

Taustapapereiden kosteuskäyristymään vaikutti selvästi poikkisuuntainen kosteuslaajenema. Kuvassa 32 on esitetty eri papereiden kosteuslaajenemat. Poikkisuuntainen kosteuslaajenema suureni kun paperia käsiteltiin. Tämä on seurausta paperin jännitysten laukeamisesta, jolloin sen jäykkyys pienenee.



Kuva 32. Taustapapereiden kosteuslaajenemat.

Papereiden kosteuspitoisuuksista havaittiin, että raakapaperin kosteus oli suurempi kuin käsitellyn (kuivattu, silikonoitu) paperin. Osa paperin kuitusidoksista vahvenee käsittelyn aikana ja osa kuitujen huokosista sulkeutuvat pysyvästi, minkä seurauksena käsiteltyjen papereiden kosteus pysyi raakapaperin kosteutta alhaisempana vielä ilmastoinnin jälkeenkin (kuva 33).



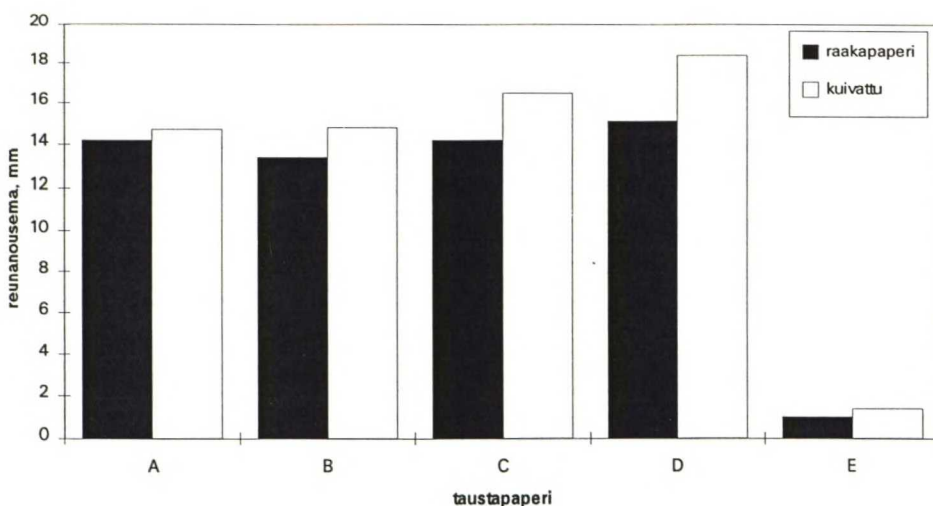
Kuva 33. Taustapapereiden kosteuspitoisuudet.



## 10.2 Laminaattien käyristyminen

Kuten edellä todettiin, niin tarralaminaatin taustapaperi käyristyy voimakkaasti kosteuden muuttuessa. Valmiin tarralaminaatin kosteuskäyristyminen ei kuitenkaan suoraan noudata taustapaperin käyristymistä. Vaikka taustapapereiden käyristymisissä olikin huomattavia eroja (kuvat 29 ja 30), niin laminaatit käyristyivät hyvin samanlaisesti (kuva 34). Poikkeuksena oli E paperista valmistettu laminaatti, joka käyristyi hyvin vähän. Syy laminaattien samanlaiseen käyristymiseen täytyy olla sen rakenteessa (taustapaperi, silikoni, liima ja etiketti), joka rajoittaa laminaatin käyristymistä.

Prosessoinnin vaikutus laminaatin käyristymiseen oli samanlainen kuin taustapaperin käyristymiseen. Kaikki kuivatusta paperista valmistetut laminaatit käyristyivät enemmän kuin raakapaperista valmistetut laminaatit. Syynä tähän on raakapaperin korkeampi lähtökosteus ja alhaisempi kosteuslaajenema. Valmiit laminaatit käyristyivät enemmän kuin pelkät taustapaperit. Tämä johtuu siitä, että laminaatissa kosteus imeytyy laminaattiin paljon nopeammin taustapaperin kuin etiketin puolelta. Taustapaperin tapauksessa kosteutta imeytyy myös silikonoitavalta puolelta (ei liimaa, ei etikettiä), mikä vähentää käyristymistä.



Kuva 34. Laminaattien (etikettinä PP) kosteuskäyristymä (32 % RH → 45 % RH).

### 10.3 Elementtimenetelmällä saadut laminaatin ominaisuudet

#### 10.3.1 Mallin rakentaminen

Käyrityssimuloinneissa käytetty malli koostui muovi- ja paperikerroksesta. Tarraliiman oletettiin olevan jäykkää eli mallissa kerrosten välissä ei tapahtunut luistamista.

Simulointeja varten olisi pitänyt tietää taustapaperin ominaisuuksien anisotropia paksuussuunnassa, koska nämä vaikuttavat paperin käyritysaipumukseen. Esimerkiksi tiheys ja jännitykset voivat vaihdella eri osissa paperia, mikä vaikuttaa paperin kosteuslaajenemiseen ja sitä kautta käyritymiseen. Sisäisten parametrien mittaaminen on kuitenkin hyvin hankalaa, eikä sitä tässä työssä suoritettu.

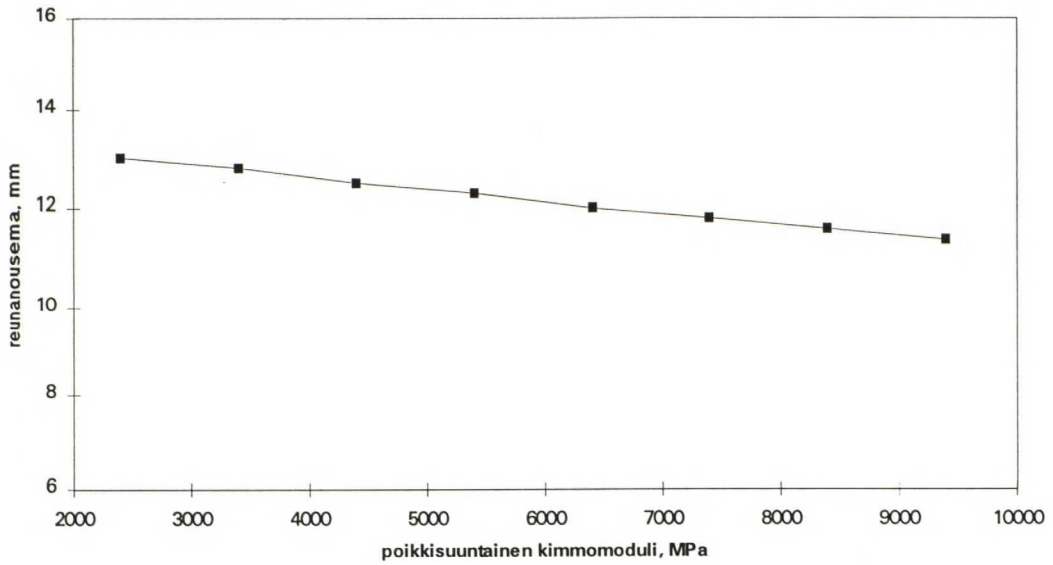
Simuloinneissa arvioitiin paperin sisäiset ominaisuudet taustapapereiden käyrityksien ja mitattujen kosteuslaajenemien perusteella. Paperi jaettiin paksuussuunnassa kahteen kerrokseen, joiden kosteuslaajenemaero asetettiin niin, että se vastaa papereista mitattuja käyrityksiä. Tämän jälkeen malliin lisättiin kolmantena kerroksena muovi, jonka jälkeen voitiin simuloida tarralaminaatin käyritystä.

#### 10.3.2 Muovin ja taustapaperin ominaisuudet

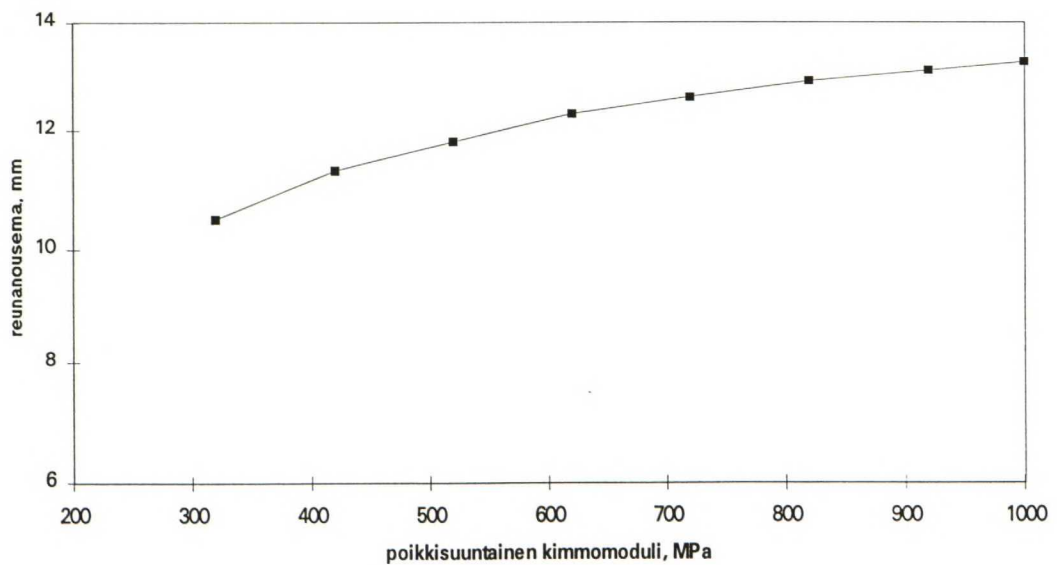
Laminaatin konesuuntaisilla ominaisuuksilla ei juuri ole merkitystä laminaatin poikkisuunnassa tapahtuvaan kosteuskäyritymiseen, koska ne ovat yleensä eri tasolla poikkisuuntaisten ominaisuuksien kanssa.

Seuraavassa esitetään eri materiaaliominaisuuksien vaikutusta tarralaminaatin käyritymiseen. Esimerkeissä on muutettu aina yhtä ominaisuutta ja laminaatin muut

ominaisuudet on pidetty vakioina, mitattujen arvojen suuruisina. Esimerkeissä näytteen koko on 90 mm.



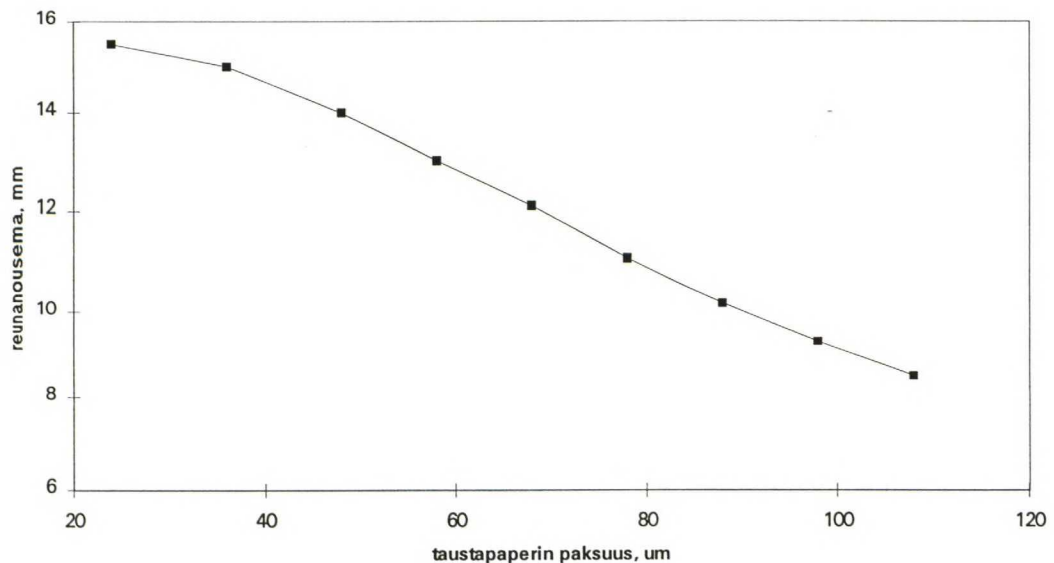
Kuva 35. Taustapaperin poikkisuuntaisen kimmomodulin vaikutus laminaatin reunanousemaan.



Kuva 36. Muovin (PE) poikkisuuntaisen kimmomodulin vaikutus laminaatin reunanousemaan.

Kuvasta 35 voidaan nähdä, että paperin poikkisuuntaisen kimmomodulin kasvaminen pienentää vain vähän laminaatin käyristymistä. Käytännössä ei ole edes mahdollista vaikuttaa paperin poikkisuuntaiseen kimmomoduliin näin paljon.

Kuvassa 36 nähdään, että muovin poikkisuuntaisella kimmomodulilla on hieman suurempi vaikutus laminaatin käyristymiseen kuin paperin kimmomodulilla. Muovin kimmomodulin kasvaessa muovi jarruttaa enemmän taustapaperin laajentumista. Kun taustapaperi ei pääse laajentumaan, niin siitä on seurauksena laminaatin käyristyminen. Muovin kimmomoduliin vaikuttaa suuresti sen raaka-aine. Esimerkiksi vaihtamalla matalatiheysinen polyeteeni (PE-LD) korkeatiheysiseen (PE-HD) saadaan jäykempää muovia. Käyttämällä samaa raaka-ainetta ei prosessoinnilla voida merkittävästi vaikuttaa muovin kimmomoduliin ja sitä kautta käyristymiseen.

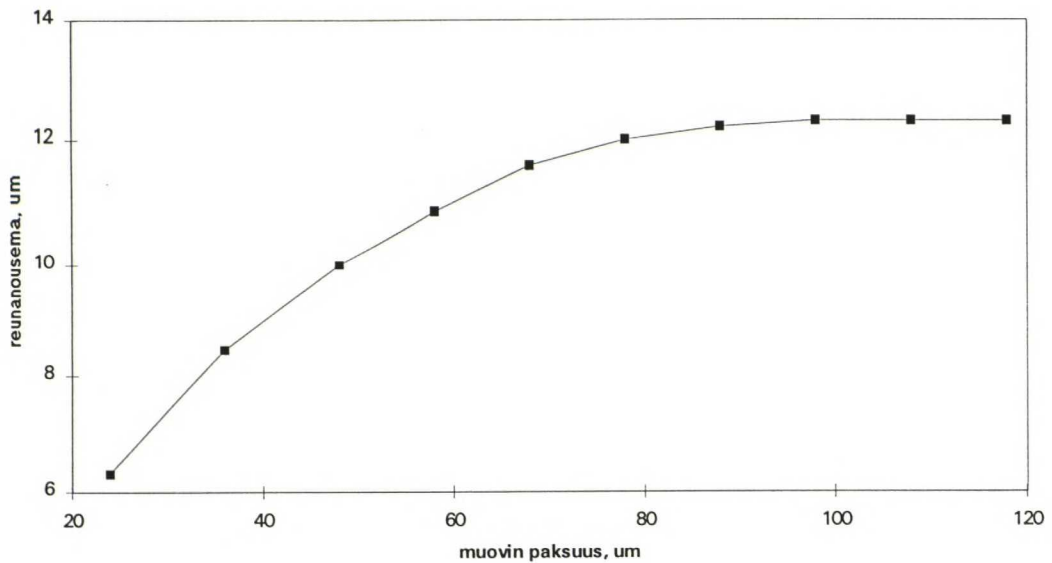


Kuva 37. Taustapaperin paksuuden vaikutus laminaatin reunanousemaan.

Taustapaperin paksuuden kasvaminen pienentää selvästi laminaatin käyristymistä (kuva 37). Tämä johtuu laajenevan kerroksen voimia vastaanottavan poikkipinta-alan kasvamisesta. Käytännössäkin on havaittu taustapaperin paksuuden kasvattamisen pienentävän laminaatin käyristymistä. Haittapuolena on paperin hinnan riippuminen



paperin paksuudesta, joten paperin paksuuden käyttö laminaatin käyristymistä estävänä tekijänä ei liene järkevin tapa toimia.



Kuva 38. Muovin (PE) paksuuden vaikutus laminaatin reunanousemaan

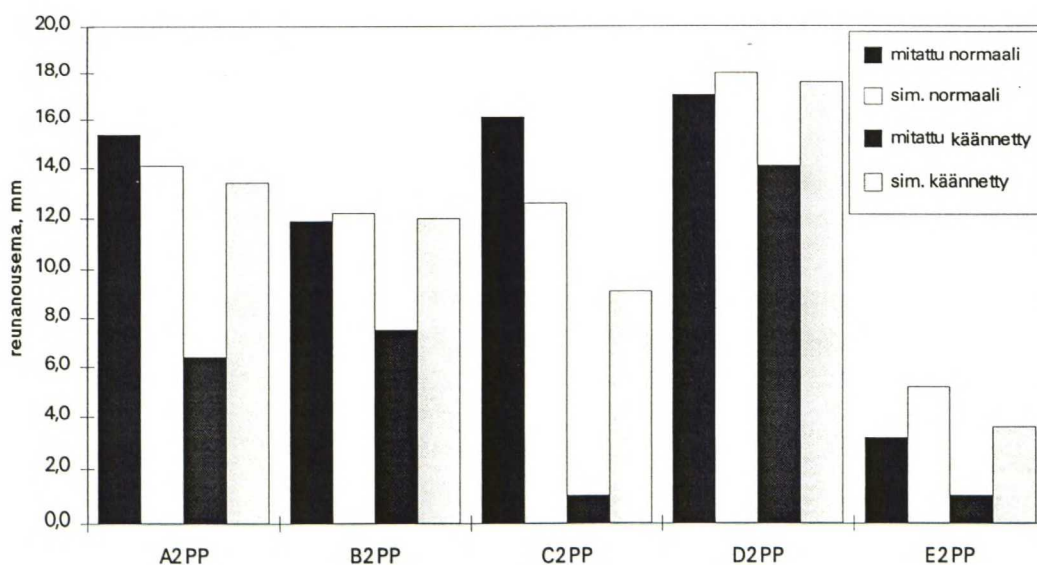
Muovin paksuuden kasvaminen suurentaa laminaatin käyristymistä (kuva 38). Kosteuteen reagoimaton muovikerros jarruttaa taustapaperin laajenemista, jolloin mitä pienempi (ohuempi muovi) jarru on, sitä enemmän paperi pääsee laajenemaan eikä laminaatti käyristy. Laminaatin valmistus ja käytettävyys asettavat kuitenkin omat rajoituksensa muovin paksuuden suhteen.

### 10.3.3 Taustapaperin käynnön vaikutus laminaatin käyristymiseen

Koemielessä valmistettiin tarralaminaattia, jossa taustapaperi käännettiin ylösalaisin eli silikonoitavaksi tarkoitettu puoli jäi ilman kanssa kosketuksiin. Samalla suoritettiin myös käyristymissimulointi mallilla, jossa taustapaperi on toisinpäin. Mittauksissa ja simuloinneissa käytettiin kuivattua paperia (koodi 2) ja etikettinä polypropeenaa.

Mitatut ja simuloidut laminaattien käyritykset oikeinpäin olevilla taustapapereilla ovat hyvin lähellä toisiaan, varsinkin glassiinipaperisilla laminaateilla. Päälystetyillä papereilla (C ja E) ero on hieman suurempi, mikä johtuu osittain päälysteestä. Superkalanterointi ei tee käyrityksen kannalta paperista yhtä epähomogeenista paksuussuunnassa kuin päälystäminen.

Erot käännettyissä papereissa ovat suuret, mutta tähän on selityksenä mallin rakennus. Kuten edellä on todettu, malli rakennettiin niin, että taustapapereiden käyrityksistä saatiin kosteuslaajenemaero paperin eri puolille. Käännettyssä paperissa ero on toisinpäin, mutta simuloinnissa kosteus pääsee liikkumaan samalla tavalla ja paperi on kosteuslaajenemaeroa lukuunottamatta paksuussuunnassa homogeenista. Simuloitujen tuloksien voidaan katsoa kuvaavan sellaista tapausta, että taustapaperi on käännetty ennen päälystystä tai superkalanterointia.



Kuva 39. Taustapaperin käynnön vaikutus laminaatin käyritykseen.

Kuvasta 39 nähdään, että kaikki todelliset laminaatit käyrityivät selvästi vähemmän, jos ne valmistettiin käännetystä taustapaperista. Tämä on johtuu siitä, että kosteuden vaikutus ja imeytyminen laminaattiin muuttuu taustapaperin käynnön seurauksena.

Glassiinipapereilla silikonoitavaksi tarkoitettu pinta on tiiviimpi kuin toinen pinta, mikä vaikuttaa kosteuden imeytymiseen. Päälystetyillä papereilla päälyste ei laajene kosteuden vaikutuksesta, jolloin paperin kääntö siirtää laajenevaa kerrosta lähemmäksi laminaatin paksuussuuntaista keskilinjaa. Tästä on seurauksena käyristymisen pienentyminen, koska laajenemisen aikaansaama momentti pienenee. Todellisuudessa ei voida laminointikoneella suoraan kääntää papereita toisinpäin käyristymisen vähentämiseksi, koska silikonin kulutus kasvaisi liikaa.

Kuvasta 39 nähdään, että simuloitaessa taustapaperin käännön vaikutus laminaatin käyristymiseen on vähäinen. Laminaatti käyristyy samaan suuntaan ja vain hieman vähemmän, kun paperi on toisinpäin. Tämä johtuu siitä, että muovi ei laajene kosteuden vaikutuksesta, jolloin se jarruttaa paperin laajenemista, ja laminaatti käyristyy. Hieman pienempi käyristyminen on seurausta siitä, että paperin enemmän laajeneva puoli on lähempänä laminaatin paksuussuuntaista keskilinjaa.

Kuvan 39 perusteella voidaan päätellä, että superkalanterointi pitäisi suorittaa siten, että se vaikuttaisi paperin eri puoliin tasaisemmin ja päälysteen käyttö paperin molemmilla puolilla vähentäisi käyristymistä. Toimenpiteiden kustannus saattaa kuitenkin estää näiden menetelmien käytön. Simuloinnin tuloksista voidaan lisäksi päätellä, että paperin eri puolien kosteuslaajenemaeroilla on merkitystä, vaikkakin vähäistä, laminaatin kosteuskäyristymiseen. Ero voidaan saada aikaan esimerkiksi kuituorientaatioerolla paperin eri puolilla.

Kuvissa 34 ja 39 mitatuissa laminaattien käyristymisissä on eroja, mikä on selitettävissä mittaustavan erilaisuudella. Verrattaessa prosessoinnin vaikutusta käyristyminen (kuva 34) mitattiin kolmen tunnin ilmastoinnin jälkeen, kun käännön vaikutusta tutkittaessa (kuva 39) laminaatit olivat poikkeuksellisesti yön yli ilmastointihuoneessa. Eroja voi aiheuttaa tietenkin myös laminaatin materiaalien epähomogeenisuus.



## 10.4 Taustapaperien sorptio-ominaisuudet

Yksi perussyö kosteuskäyristymiseen on se, että paperin kosteuspitoisuus ei ole sama kuin sen tasapainokosteus vallitsevassa ilman suhteellisessa kosteudessa. Tämän takia määritettiin yhtälössä 20 mainitut kosteuisotermiä taustapapereille. Liitteessä 2 on kuvattu mittausmenetelmä.

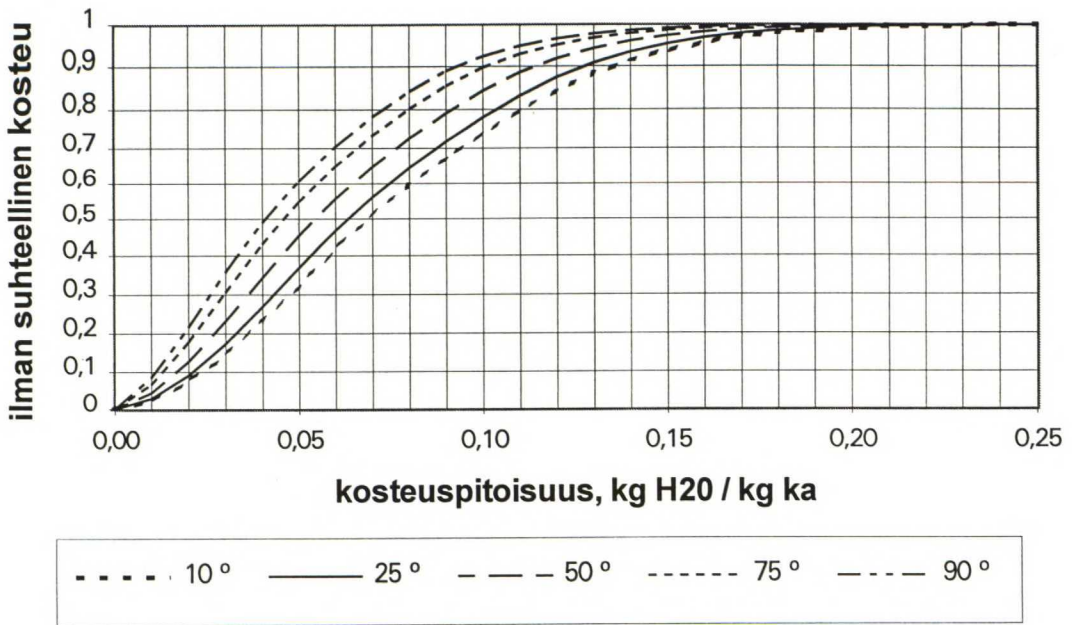
Kosteuisotermien perusteella voidaan määrittää, mikä paperin kosteuspitoisuus tulee olla missäkin käyttökohteessa. Lisäksi voidaan arvioida eri papereiden käyristymistäipumusta. Taulukossa 10 on esitetty sorptiomittauksista saadut muuttujat  $m$  ja  $n$  käytetyille taustapapereille. Kullekin paperille ominaisten muuttujien  $m$  ja  $n$  ratkaiseminen mahdollistaa isotermikäyrästäön piirtämisen. Käyrästäön avulla voidaan määrittää laminaatin taustapaperille ihanteellinen kosteuspitoisuus tai vaihtoehtoisesti missä kosteus-lämpötila -ympäristössä laminaatin jatkokäsittely tulee suorittaa.

Kuvassa 40 on esitetty kosteuisotermikäyrät paperille A1 eri lämpötiloissa. Liitteessä 4 on esitetty kosteuisotermimittausten tulokset.

Taulukko 10. Kosteuisotermien yhtälössä olevat muuttujat  $m$  ja  $n$  eri papereille.

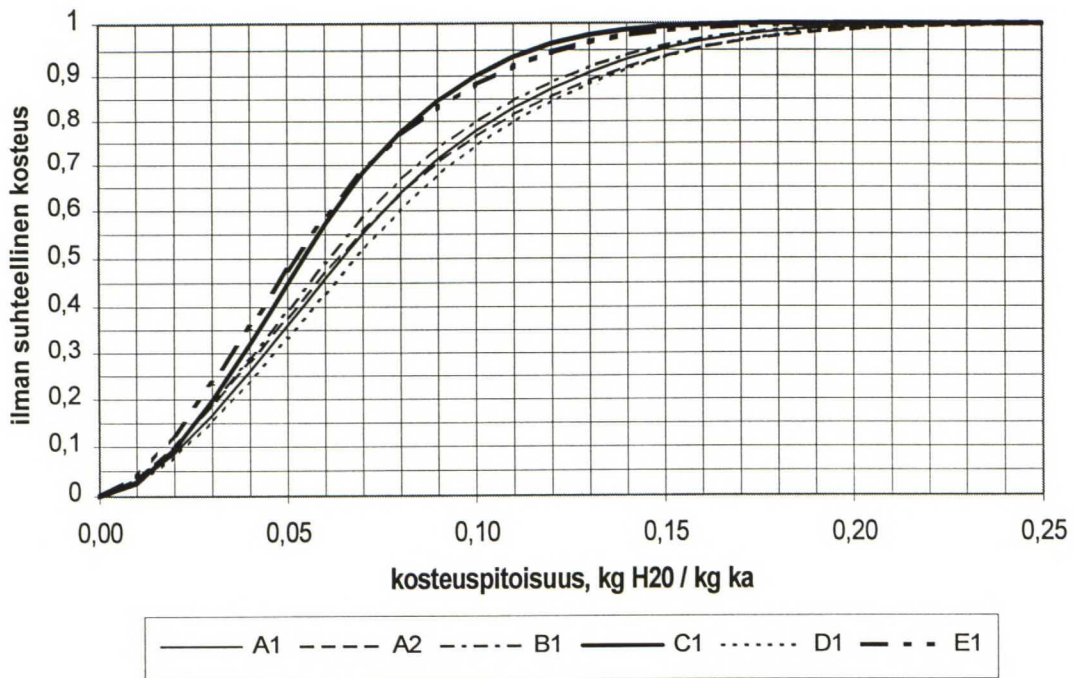
paperi	$m = s_1 + s_2 \times T$	$n = s_3 + s_4 \times T$
A1	$82,221 - 0,086 T (^{\circ}\text{C})$	$1,822 - 0,004 T (^{\circ}\text{C})$
B1	$78,264 + 0,003 T (^{\circ}\text{C})$	$1,789 - 0,004 T (^{\circ}\text{C})$
C1	$248,886 - 1,719 T (^{\circ}\text{C})$	$2,166 - 0,009 T (^{\circ}\text{C})$
D1	$81,248 - 0,226 T (^{\circ}\text{C})$	$1,863 - 0,005 T (^{\circ}\text{C})$
E1	$134,009 - 0,877 T (^{\circ}\text{C})$	$1,895 - 0,007 T (^{\circ}\text{C})$
A2	$46,270 + 0,526 T (^{\circ}\text{C})$	$1,638 - 0,001 T (^{\circ}\text{C})$





Kuva 40. Taustapaperin A1 kosteuisotermi viidessä eri lämpötilassa.

Kuvasta 40 nähdään, että lämpötilan kasvaminen pienentää selvästi paperin tasapainokosteuspitoisuutta. Esimerkiksi ilman suhteellisessa kosteudessa 50 % paperin A1 kosteuspuitoisuus lämpötilassa 10 °C on 0,069 kg H<sub>2</sub>O / kg ka (6,5 %) ja lämpötilassa 90 °C on 0,0408 kg H<sub>2</sub>O / kg ka (3,9 %). Lämpötila vaikuttaa samansuuntaisesti kaikilla papereilla. Kuvassa 41 on esitetty kosteuisotermikäyrät työssä käytetyille taustapapereille eri ilman suhteellisissa kosteuksissa lämpötilassa 25 °C.



Kuva 41. Taustapapereiden kosteusisotermikäyrät lämpötilassa 25 °C.

Kuvasta 41 nähdään, että eri paperilaatujen tasapainovesipitoisuudet eroavat toisistaan selvästi. Päälystettyjen sellupapereiden (C1 ja E1) kosteus on alhaisempi kuin glassiinipapereiden, mikä johtuu siitä, että päälyste ei ime itseensä kosteutta. Paperilaatujen sisällä erot ovat mittausten perusteella noin puolen prosentin sisällä. Vastoin odotuksia kuivattu paperi (A2) adsorpoi kosteutta samalla lailla kuin raakapaperi (A1). Tämä johtuu mittausjärjestelystä, jossa paperinäytteet olivat purkeissa ja purkkeihin syntyvä paine tasasi kosteuspitoisuutta. Todellisuudessa kertaalleen voimakkaasti kuivattu paperi ei saavuttanut raakapaperin kosteuspitoisuutta edes viiden kuukauden ilmastoinnin jälkeen.

Kosteusisotermimittausten perusteella voidaan määrittää eri taustapapereille optimaalinen kosteuspitoisuus eri käyttöolosuhteissa. Glassiinipaperin kosteus normaaleissa paino-olosuhteissa (ilman suhteellinen kosteus 50 % ja lämpötila 25 °C) pitää olla noin 6 %, jotta kosteutta ei siirtyisi ilman ja paperin välillä aiheuttaen käyristymistä. Päälystettyjen sellupapereiden kosteuden pitää olla noin 5 %.

11 PROSESSIOLOSUHTEIDEN VAIKUTUS KÄYRISTYMISEEN

Määritettäessä laminaatin materiaaliominaisuuksia huomattiin, että laminointikoneen suurin vaikutus laminaatin käyristymiseen on se, että millaiseksi taustapaperin kosteuspitoisuus muodostuu. Käytännössä on havaittu, että taustapaperin kosteuspitoisuus laminointikoneen jälkeen riippuu sen alkuperäisestä kosteudesta, liiman loppukosteudesta ja mahdollisesta taustapaperin kostutuksesta.

Laminointikoneen prosessiolosuhteiden vaikutusta laminaatin käyristymiseen tutkittiin sekä koeajoilla että simuloinneilla.

Koeajojen koesuunnitelma on esitetty taulukossa 11. Mittausarvot ovat liitteissä 3 ja 5.

Taulukko 11. Prosessiolosuhteiden vaikutuksen testauksen koesuunnitelma

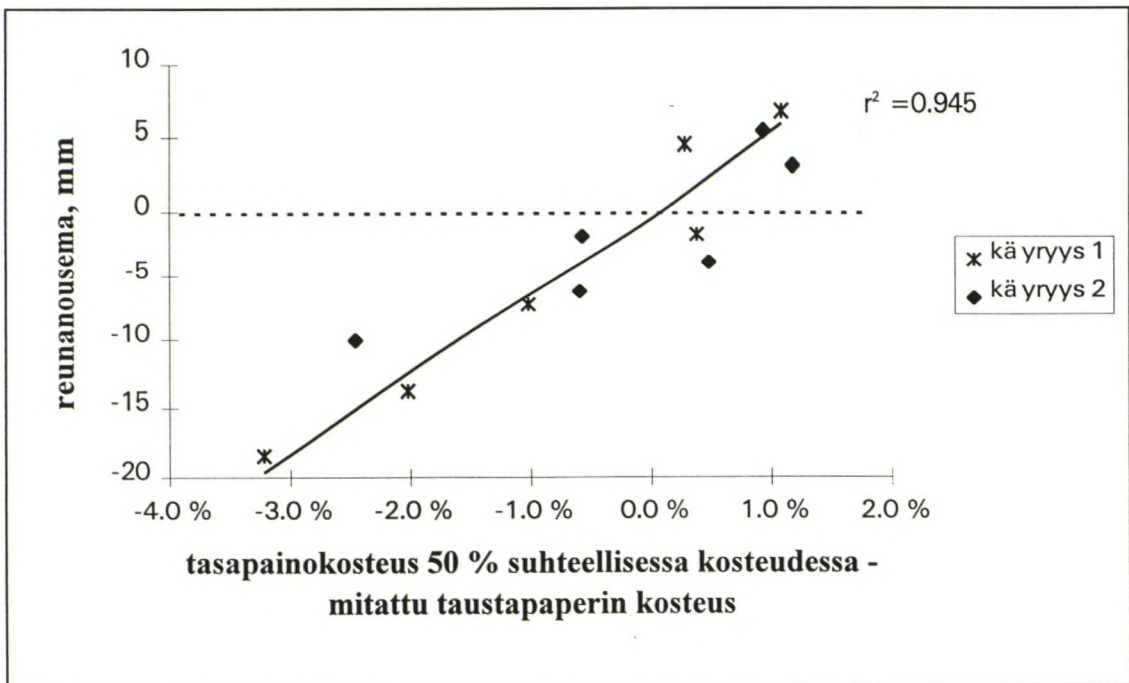
koepiste	koneen kostutus	nopeus	liimamäärä	vakioina pidettiin
1	pois	normaali	normaali	kuivatus (1×IR + 2×ilmakuivain) liiman sivelykuiva-ainepitoisuus taustapaperin alkukuiva-ainepitoisuus
2	päällä	normaali	normaali	
3	päällä	normaali	korkea	
4	pois	normaali	korkea	
5	pois	hidas	normaali	
6	päällä	hidas	normaali	

11.1 Taustapaperin kosteuden vaikutus laminaatin käyristymiseen

Koeajoissa pyrittiin saamaan taustapaperiin erilaisia kosteuspitoisuuksia, jotta voitiin verrata laminaatin kosteuskäyristymistä ja taustapaperin kosteuspitoisuutta toisiinsa. Laminoinnin jälkeen laminaatit suljettiin muovikääreeseen, jotta taustapaperi ei pääsisi kosketuksiin ympäröivän ilman kanssa. Laminaattien kosteudet ja käyristymät mitattiin sekä kolmen päivän että kahden viikon kuluttua laminointipäivästä.



Kuvassa 42 on esitetty laminaatin käyristyminen taustapaperin kosteuseron funktiona. Kosteuserolla tarkoitetaan tässä taustapaperin tasapainokosteuden (laskettu isotermeistä) ja taustapaperista mitatun kosteuden erotusta. Kuvassa 42 esitetyt käyristymät on saatu siten, että tarralaminaatti poistettiin muovikääreestä ja käyristyminen mitattiin viiden minuutin ilmastoinnin (50 % RH) jälkeen. Tässä ajassa koko taustapaperin kosteus ei ehdi tasaantua ympäröivän ilman kosteuden kanssa, mutta paperin pintaosien kosteus alkaa muuttua. Tämä riittää aiheuttamaan laminaatin käyristymisen. Tällaisella lyhyellä aikavälillä mitattu käyristyminen kertoo paremmin mahdollisista ongelmista painatusvaiheessa kuin paperin paksuussuuntaisen kosteusprofiilin tasaantumisen jälkeen mitattu käyryys. Käyryyden mittausta kosteusprofiilin tasaantumisen jälkeen voidaan käyttää verrattaessa muiden kuin pelkän kosteuspitoisuuden vaikutusta laminaatin käyristymiseen.



Kuva 42. Laminaatin taustapaperin kosteuspitoisuuden vaikutus laminaatin käyristymiseen. Taustapaperi B, muovi PP.  
 käyryys 1 = mittaus 3 päivää laminoinnin jälkeen  
 käyryys 2 = mittaus 2 viikkoa laminoinnin jälkeen

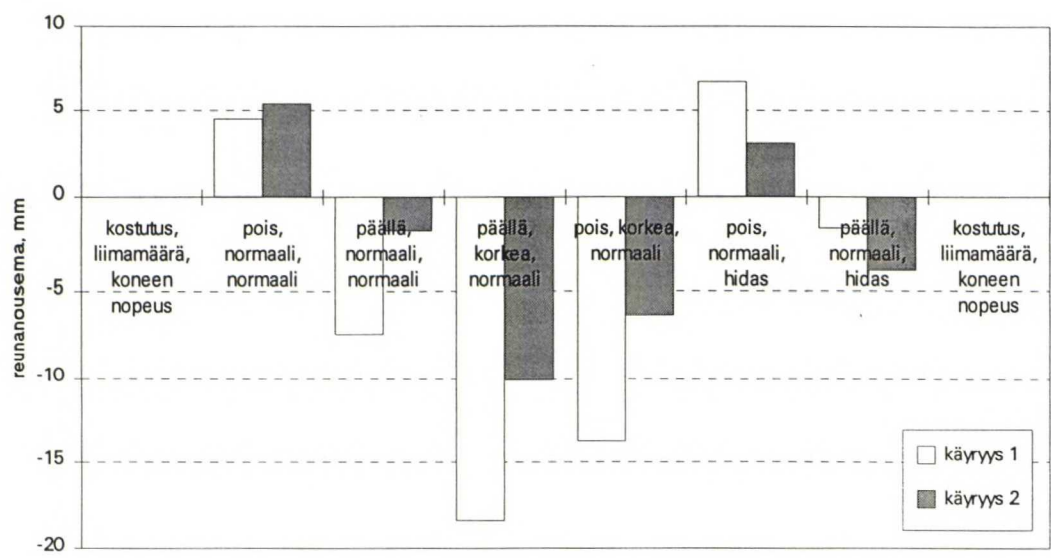


Kuvasta 42 havaitaan selvä suuntaus kosteuseron ja reunanouseman välillä. Laminaatti käyristyy pois päin etiketistä taustapaperin ollessa kosteampaa kuin sen tasapainokosteus. Jos taustapaperin on kuivempaa kuin tasapainokosteus, niin käyristyminen on kohti etikettiä. Tämä on seurausta paperin laajenemisesta/kutistumisesta kosteuden muuttuessa. Kuvassa oleva regressiosuora on laskettu käyryys 1 -arvoista. Käyristymisen muuttuminen kahden viikon varastoinnin aikana johtuu kosteuden siirtymisestä liiman ja taustapaperin välillä.

Kuvassa 42 esitetty kosteuspitoisuuden ja kosteuskäyristymisen välinen suhde on paperi- ja laminaattikohtainen. Taustapapereilla on erilaiset kosteuslaajenemat, jotka vaikuttavat laminaatin käyristymiseen. Taustapaperin kosteuslaajeneman ja yleisesti kosteusreaktiivisuuden suurentuminen kasvattaa kuvassa esitetyn regressisuoran kulmakerrointa, mikä lisää laminaatin käyristymistäipumusta. Mitä vähemmän taustapaperi reagoi kosteuden muutokseen (kulmakerroin pieni), sitä enemmän taustapaperin kosteus saa poiketa ihannearvosta. Myös etikettimateriaalin ominaisuudet vaikuttavat käyristymiseen eli kosteuskäyristyminen on laminaattikohtainen.

## 11.2 Taustapaperin kostutuksen ja liiman jäännöskosteuden merkitys

Taustapaperin kosteuteen pystyttiin vaikuttamaan taustapaperin kostutuksella ja liiman jäännöskosteudella. Kuvassa 43 on esitetty toisessa muodossa käyristymämittausten tulokset. Kuvien 42 ja 43 perusteella voidaan päätellä, että laminaatin käyristyminen johtuu suurimmaksi osaksi taustapaperin kosteuspitoisuudesta. On kuitenkin todennäköistä, että sillä on merkitystä, tuleeko kosteus paperiin erillisen kostutuksen avulla vai liiman epätäydellisen kuivatuksen johdosta. Erillisessä kostutuksessa paperi voi joutua sellaiselle kosteus-lämpötila -alueelle, että paperin pinnasta laukeaa jännityksiä vaikuttaen käyristymiseen. Liimasta siirtyvä kosteus ei laukaise jännityksiä, koska siirtyminen tapahtuu varastoinnin aikana suhteellisen alhaisissa lämpötiloissa.



Kuva 43. Tarralaminaatin käyristyminen erilaisilla prosessoinneilla.  
Taustapaperi B, muovi PP.  
käyryys 1 = mittaus 3 päivää laminoinnin jälkeen  
käyryys 2 = mittaus 2 viikkoa laminoinnin jälkeen

Tuotantokoneelta ei suoritettu kuin yksi koepiste, mutta koekoneelta tehdyt havainnot liimamäärien ja kostutuksien vaikutuksista pätevät myös tuotantokoneelle. Tuotantokoneella valmistetun laminaatin havaittiin käyristyvän suunnilleen yhtä paljon kuin koekoneella valmistettu laminaatti (taulukko 12), jos taustapaperin kosteuspitoisuus oli sama.

Taulukko 12. Koe- ja tuotantokoneella valmistettujen laminaattien käyryys (50 % RH).

Laminointikone	laminaatin reunanousema ilmastoinnin jälkeen	taustapaperin kosteus laminoinnin jälkeen
koekone	12,1 mm	5,7 %
tuotantokone	15,2 mm	5,5 %

## 12 LAMINOINTIPROSESSIN SIMULOINTI

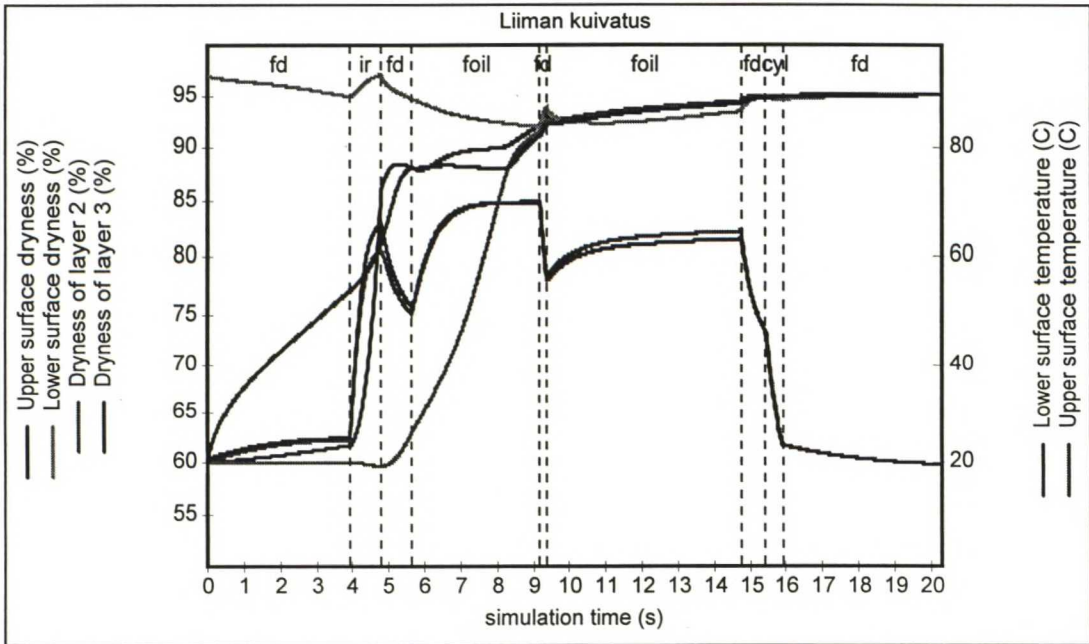
Laminaatin valmistuksessa on tärkeätä saada liima mahdollisimman kuivaksi, jotta liiman kosteus ei lisäisi taustapaperin kosteutta. Taustapaperin kosteus muuttuu useaan otteeseen laminointiprosessissa ja sen jälkeen. Kuivimmillaan paperi on silikonin verkkouttamisen jälkeen, jolloin kosteus on 2-3 %. Liiman kuivatuksen jälkeen paperin kosteus normaaliajotavoilla on 4-6 %. Jos liima jää kosteaksi, niin sen sisältämä kosteus voi nostaa taustapaperin kosteuden jopa 8-9 %:iin.

Laminointiprosessin simuloinnissa keskityttiin liiman kuivatukseen ja taustapaperin kostutukseen. Simuloinnin avulla etsittiin niitä laminointikoneen muuttujia, jotka vaikuttavat taustapaperin laminoinnin jälkeiseen kosteuteen. Simuloinnissa käytettiin Coatman-ohjelmaa, jolle annettiin syöttötietoina mitattuja parametrejä koekoneelta. Ohjelma viritettiin laskemaan liiman ja paperin kosteudet mahdollisimman tarkasti oikein mitattuihin arvoihin verrattuna. Liitteessä 5 on esitetty Coatmanin viritystä varten koekoneelta tehtyjen mittauksien tulokset.

Coatmanilla tehdyt simuloinnit eivät vastaa täysin todellisia, mitattuja arvoja, mutta sitä voidaan hyvin käyttää tutkittaessa eri muuttujien vaikutussuuntia. Coatmanin tarkempi viritys edellyttäisi paljon suurempaa mittaustiedon keräystä eri kohdista laminointiprosessia. Laskennan tarkkuuteen vaikuttaa laskennassa käytettyjen paksuussuuntaisten kerrosten määrä. Simuloinneissa käytettiin kymmentä kerrosta, jolloin liima jakaantui kolmeen kerrokseen ja taustapaperi seitsemään kerrokseen.

Kuvassa 44 on esimerkki Coatmanilla simuloidusta tarraliiman kuivatuksesta .





Kuva 44. Esimerkki Coatmanin graafisesta tulostusikkunasta. Upper surface on liiman avoin kerros, layer 2 on liiman keskikerros, layer 3 on liiman paperia vasten oleva kerros ja lower surface on paperin avoin kerros.

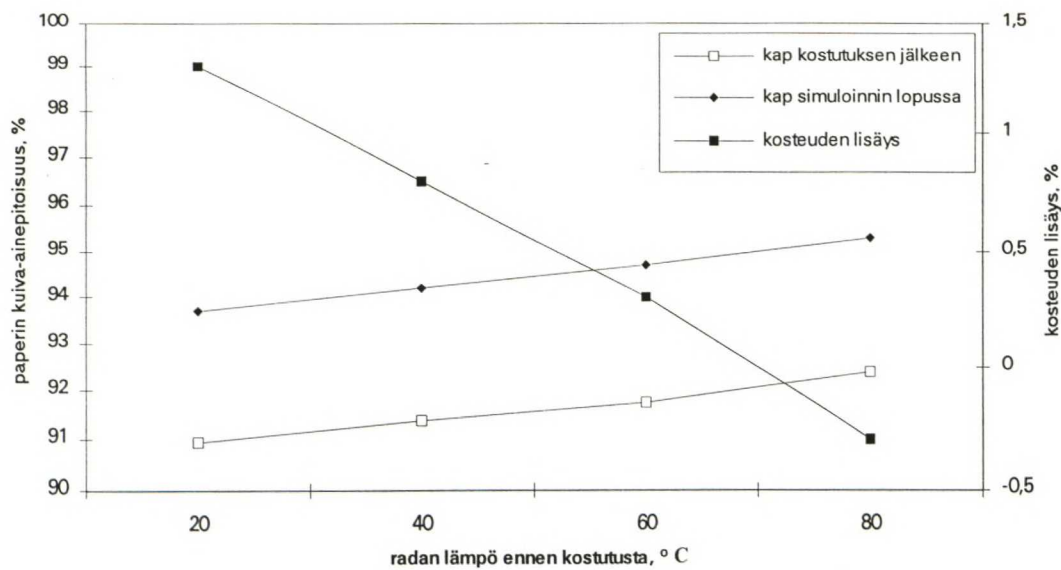
### 12.1 Taustapaperin kostutuksen simulointi

Kostutuksen simuloinneissa tutkittiin seuraavien muuttujien vaikutusta taustapaperin kostuttamiseen: paperin lämpötila ja alkukosteus, paperiradan nopeus, jäähdytysylinterit sekä kostuttimen omat muuttujat.

Kostuttamisen aikana paperi lämpenee kunnes se saavuttaa lämpötilan, jossa veden haihtuminen ja kondensoituminen tapahtuvat samalla nopeudella. Simulointien aikana paperin lämpötila nousi kostuttimella 80-90 °C:een, riippuen hieman simuloinnissa käytetyistä muuttujista. Tämä vastaa muutaman asteen tarkkuudella koekoneelta mitattuja todellisia lämpötiloja. Paperin lämpötila nousee rajalämpötilaansa ja tasaantuu z-suunnassa erittäin nopeasti.



Paperin lämpötilan vaikutus paperin kostumiseen näkyy kuvasta 45. Kuvasta 45 nähdään myös, että paperi on ollut kosteampaa kostuttimen lopussa kuin koko simuloinnin jälkeen. Tämä johtuu siitä, että paperi on kostunut sen tasapainokosteutta enemmän ja luovuttaa ylimääräistä kosteutta ilmaan kostuttimen jälkeen. Paperin kosteuspitoisuutta saadaan nostettua sitä enemmän mitä kylmempää paperi on ennen kostuttimeen tuloa, koska kostuminen on eksoterminen reaktio. Simulointien ja mitattujen lämpötilojen perusteella voidaan päätellä, että käytetyn taustapaperin kostumisen rajalämpötila on noin 85 °C. Paperin lämpötilan on oltava tätä alhaisempi, jotta paperia voidaan kostuttaa olemassa olevalla laitteistolla. Käytännössä paperin lämpötilaa voidaan laskea ennen kostutusta jäähdytysylinterin avulla. Ongelmia voi kuitenkin aiheuttaa kostuttimesta tulevan höyryn tiivistyminen sylinterin pinnalle.

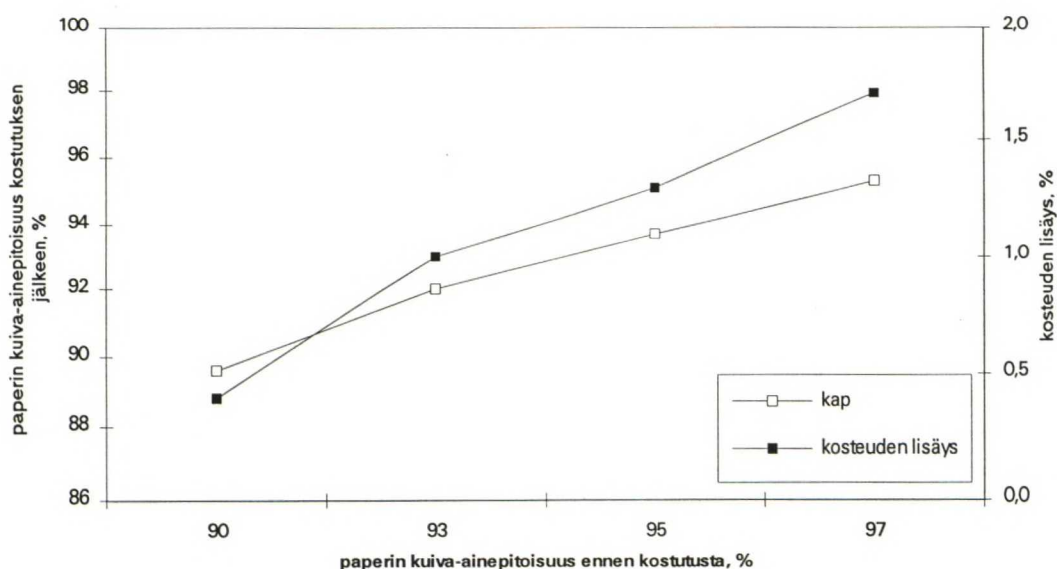


Kuva 45. Paperin lämpötilan vaikutus paperin kostumiseen. Paperin kuiva-ainepitoisuus ennen kostutusta oli 95 %.

Paperin kosteuspitoisuuden muodostumiseen vaikuttaa myös lämpötilan alenemistapa kostuttimen jälkeen. Jos paperin lämpötila lasketaan nopeasti kostuttimen jälkeen jäähdytysylinterin avulla, niin simulointien mukaan paperin kosteuspitoisuus on noin yhden prosentin suurempi kuin ilman jäähdytysylinteriä. Lämpötilan laskiessa paperin

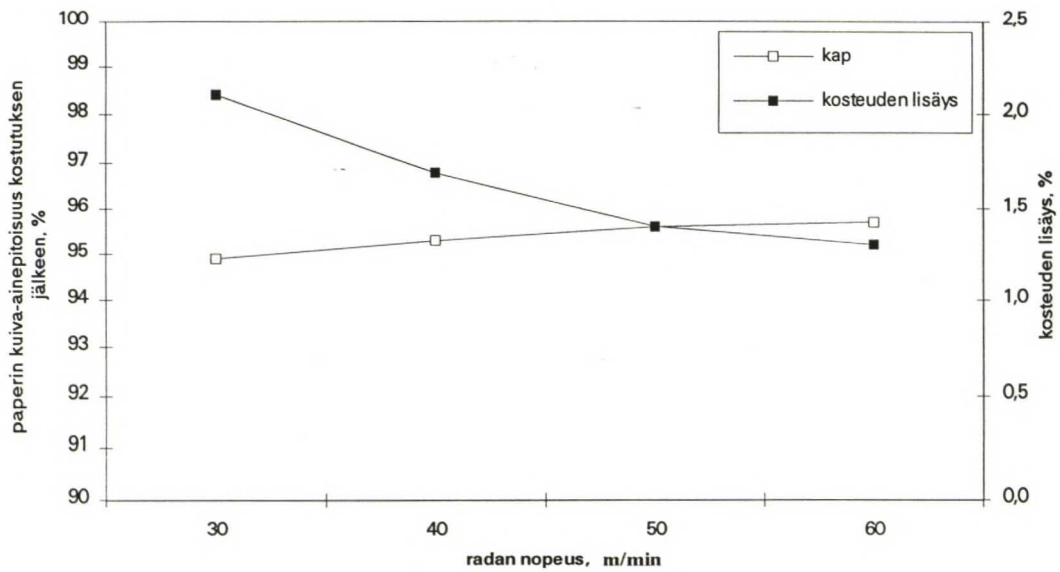
kosteus lähtee laskemaan kohti tasapainotilaa, jos paperiin on ajettu ylimääräistä kosteutta. Paperin lämpötilan alentuessa nopeasti (käytetään jäähdytystä) vesihöyryä kondensoituu enemmän kuin lämpötilan laskiessa hitaasti. Jäähdytystela tulisi olla mahdollisimman lähellä kostutinta, jotta kuumasta paperista ei haihtuisi kosteutta ilmaan.

Paperin alkuperäisen kosteuden vaikutus paperin kostumiseen oli selvä (kuva 46). Mitä suurempi oli paperin kuiva-ainepitoisuus ennen kostutusta sitä enemmän kosteutta se ottaa vastaan. Tämä johtuu paperin taipumuksesta asettua tasapainoon ympäröivän ilman kosteuden kanssa.



Kuva 46. Paperin alkuperäisen kosteuden vaikutus paperin kostumiseen. Paperin lämpötila oli ennen kostutusta 20 °C.

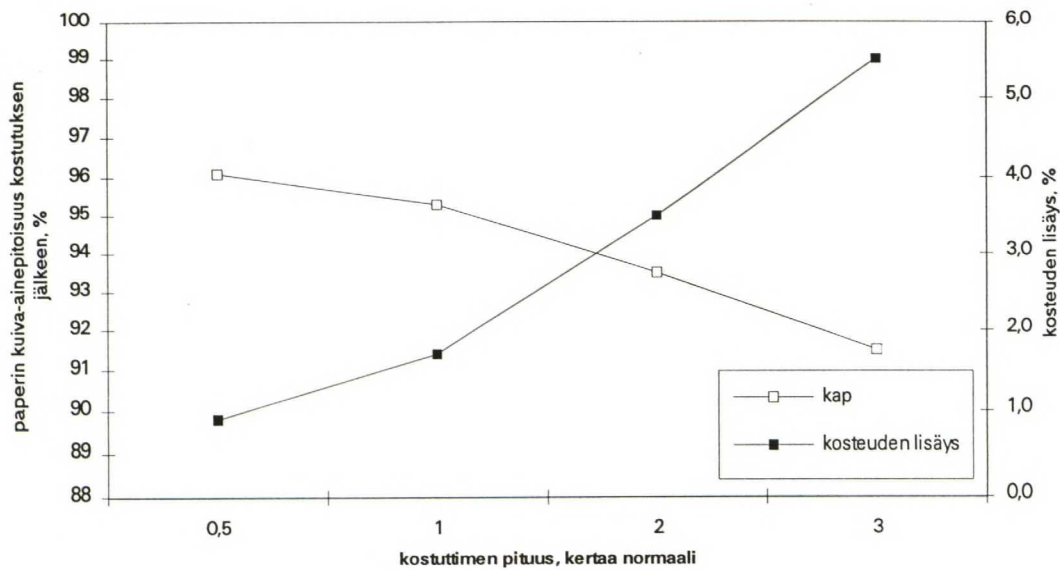
Paperinradan kulkunopeus vaikuttaa kostumiseen kuvan 47 mukaisesti. Nopeuden noustessa paperin viipymäaika kostuttimessa pienenee, mikä näkyy saavutetuissa kosteuden lisäyksissä. Nopeuden nouseminen vaikuttaa myös sitä kautta, että höyryn kyky läpäistä paperin kuljettamaa ilmakerrosta heikkenee, joten vähemmän höyryä kondensoituu rainaan.



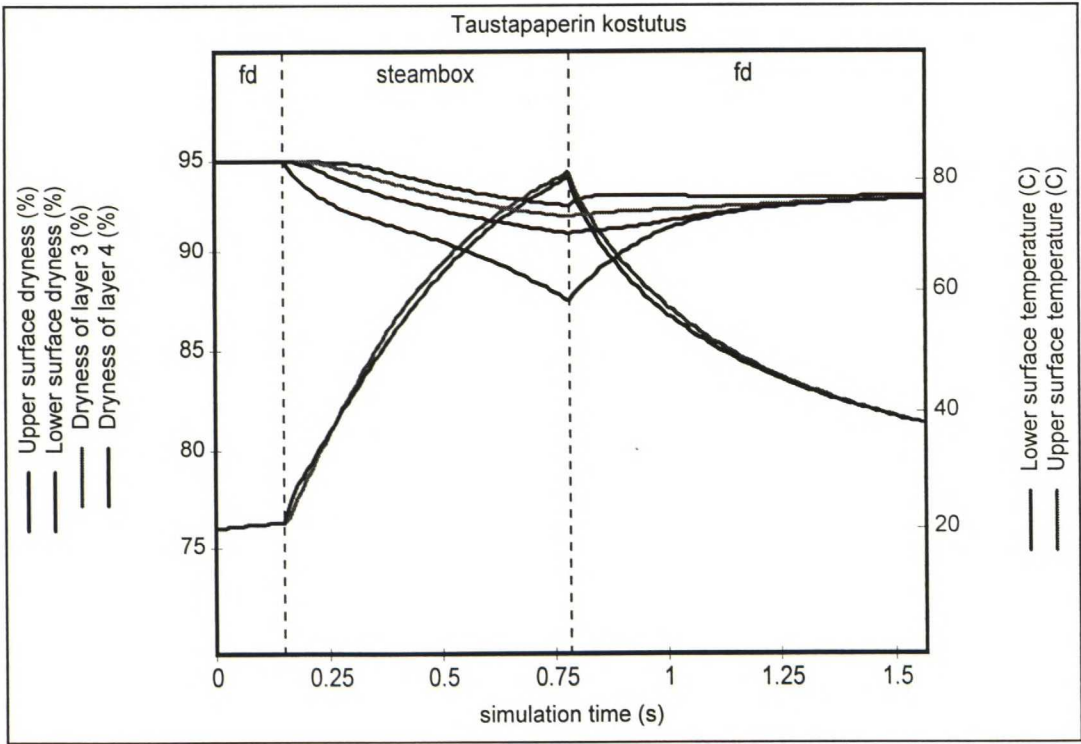
Kuva 47. Ratanopeuden vaikutus paperin kostumiseen. Paperin lämpötila oli 20 °C ja kuiva-ainepitoisuus 97 % ennen kostutusta .

Selvimmän kostuttimen muuttujista vaikutti kostuttimen pituus. Kuten kuvasta 48 nähdään paperin kosteuden lisäyksen riippuvan erittäin vahvasti kostuttimen pituudesta eli kostutusajasta.

Kostutuksen aikana paperin kosteus alkaa lisääntyä kostuttimen puolelta ja tasaantuu nopeasti kostuttimen jälkeen. Kostuttimessa paperin se puoli, joka on kostutinta kohti, voi simulointien perusteella joutua sellaiselle kosteus-lämpötila -alueelle, että pinnan jännitykset laukeavat. Kuvassa 49 on esitetty taustapaperin höyrykostutuksen simuloinnin graafinen tuloste. Paperin pinnan kosteus on suurimmillaan lähes 15 % ja lämpötila on noin 85 °C. Tämä laukaisee jännityksiä paperista, mikä vaikuttaa laminaatin käyristymiseen. Taustapaperiin syntyy myös uusia jännityksiä paperin kuivuessa uudestaan. Jännitysten laukeaminen vähentää paperin jäykkyyttä, jolloin kosteuden muuttuessa paperi muuttuu mittojaan enemmän kuin jäykempi paperi. Toisaalta kostuttimella voidaan nostaa paperin kosteuspitoisuus sille tasolle, mikä on sen tasapainokosteus käyttöolosuhteissa. Tällöin paperi ei käyristy vaikka sen jäykkyys onkin pienentynyt.



Kuva 48. Kostuttimen pituuden vaikutus paperin kostumiseen. Normaali kostuttimen pituus on 0,42 m. Paperin lämpötila oli 20 °C ja kuiva-ainepitoisuus 97 % ennen kostutusta .

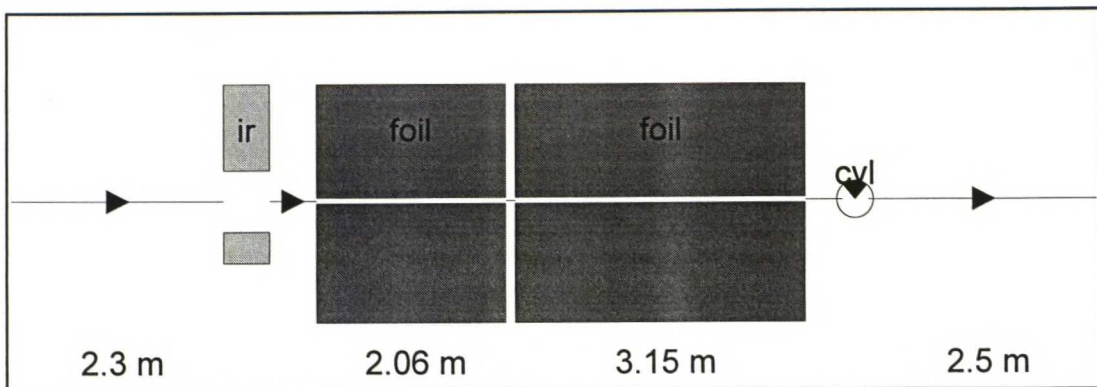


Kuva 49. Esimerkki taustapaperin höyrykostutuksesta. Kostutus paperin alapuolelta.



## 12.2 Liiman kuivatuksen simulointi

Liiman kuivatuksen simuloinneissa tutkittiin seuraavien muuttujien vaikutusta liiman kuivumiseen: liiman sivelykuiva-ainepitoisuus ja -lämpötila, liimamäärä, paperin alkukuiva-ainepitoisuus ja -lämpötila, paperiradan nopeus sekä kuivattimien säädöt. Taulukossa 13 on esitetty simuloinneissa käytetyt perustasot ko. muuttujille. Simulointien lopputulosta esittävässä kuvassa on ilmoitettu, minkä muuttujan tasoa on vaihdettu. Kuvassa 50 on esitetty simuloinneissa käytetyn koneen rakenne.



Kuva 50. Liiman kuivatuksen simuloinneissa käytetyn koneen rakenne.

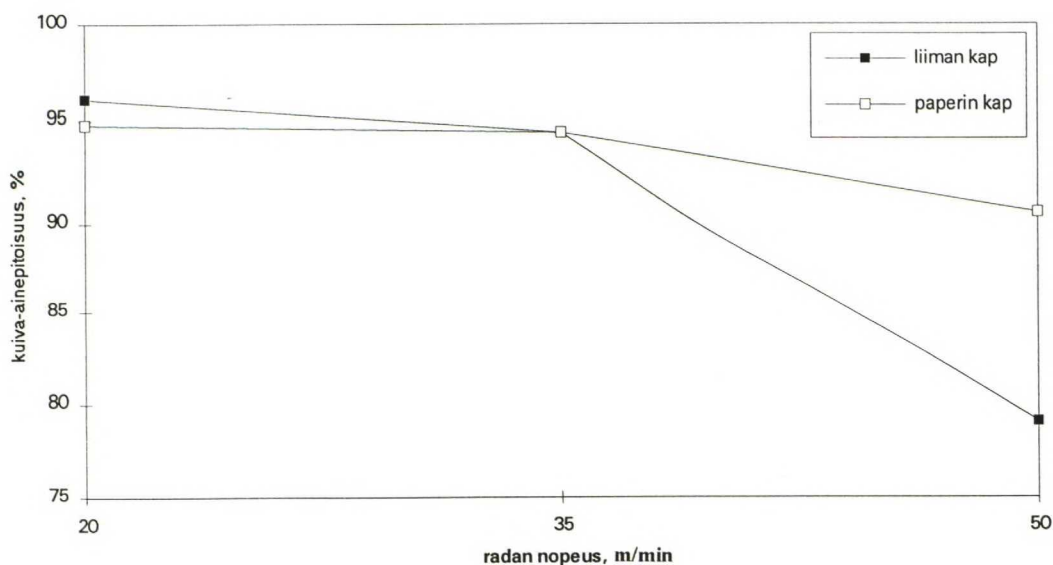
Liiman kuivatuksen simuloinneissa tarkasteltiin liiman keskimääräisen kosteuden lisäksi myös liiman paksuussuuntaista kosteusprofiilia. Liiman kuivatuksessa dispersioliiman yläpinta saattaa kuivua liiaksi, jolloin pinta sulkeutuu estäen liiman keskikerroksissa olevan veden poistumisen liimasta. Tällä tavalla liimaan jäävä kosteus imeytyy myöhemmin taustapaperiin muuttaen sen kosteutta.

Taulukko 13. Liiman kuivatuksen simuloinnin muuttujien perustasot.

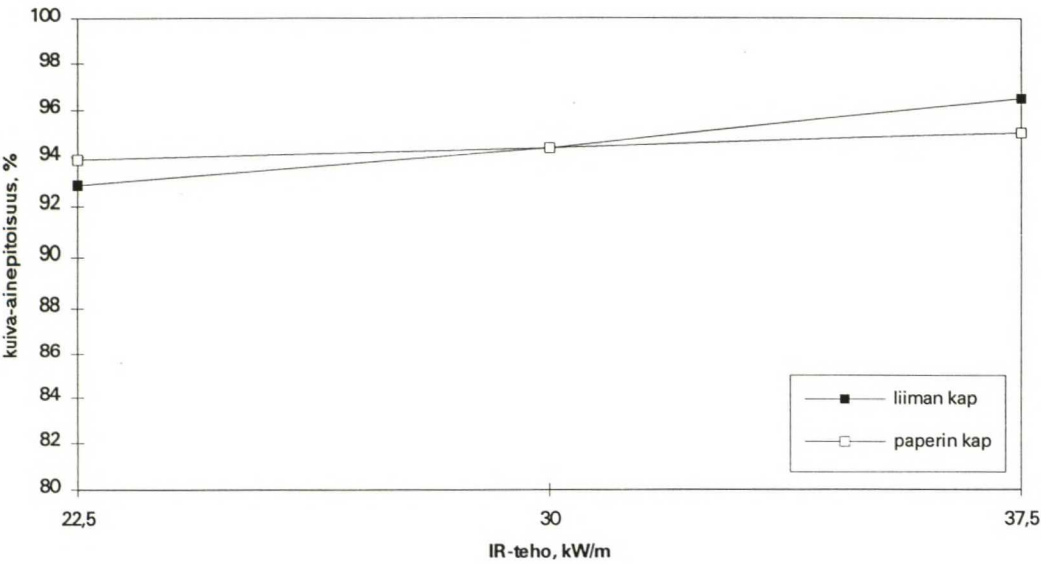
Muuttuja	taso
liiman sivelykuiva-ainepitoisuus	60 %
liiman alkulämpötila	20 °C
paperin alkukuiva-ainepitoisuus	95 %
paperin alkulämpötila	20 °C
paperiradan nopeus	35 m/min
IR	30 kW/m
1. kuivatin	115 °C
2. kuivatin	170 °C

### 12.2.1 Keskimääräiset kosteudet

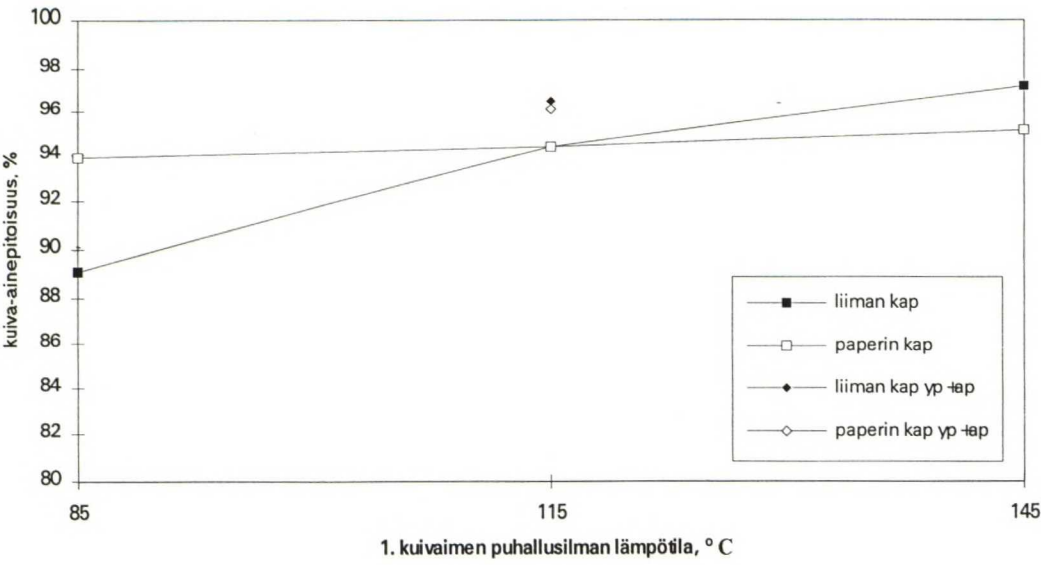
Taustapaperin ja liiman lopulliseen kosteuteen vaikuttavat laminointikoneen säädöt (kuvat 51-54). Laminointikoneen nopeuden nousu aiheuttaa sekä paperin mutta varsinkin liiman kosteuden nousun, koska kuivatusaika lyhenee. Kuivattimien säädöt vaikuttavat enemmän liiman kuin taustapaperin kosteuteen. IR-kuivattimen tehon nostaminen nostaa paperin ja liiman lämpötilaa, jolloin veden haihtuminen nopeutuu ja saavutetaan kuivempi lopputuote. Ilmakuivattimien puhallusilman lämpötilan nostaminen lisää veden haihtumista, jolloin liiman kuivuminen tehostuu. Puhaltamalla kuumaa ilmaa myös radan alapuolelta saavutetaan sama liiman kosteustaso kuin puhaltamalla vain yläpuolelta 30-40 °C kuumempaa ilmaa. Alapuolelta puhaltaminen kuivattaa kuitenkin taustapaperia entisestään.



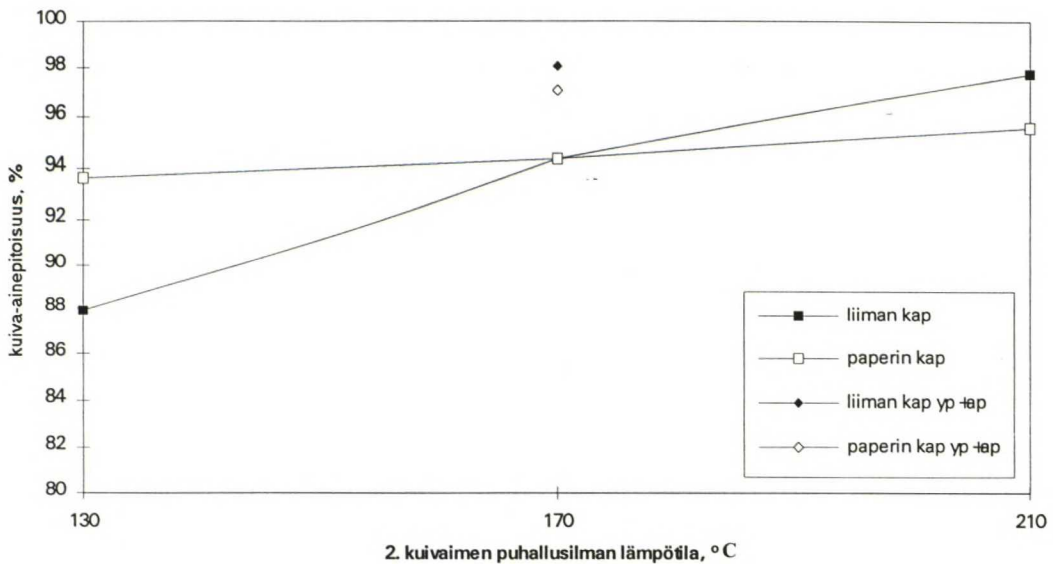
Kuva 51. Liiman ja taustapaperin loppukuiva-ainepitoisuus laminointikoneen nopeuden funktiona.



Kuva 52. Liiman ja taustapaperin loppukuiva-ainepitoisuus IR-kuivattimen tehon funktiona



Kuva 53. Liiman ja taustapaperin loppukuiva-ainepitoisuus 1. kuivaimen puhallusilman lämpötilan funktiona. yp+ap puhallus molemmilta puolilta.



Kuva 54. Liiman ja taustapaperin loppukuiva-ainepitoisuus 2. kuivaimen puhallusilman lämpötilan funktiona. yp+ap puhallus molemmilta puolilta.

Taustapaperin ja liiman lopullinen kosteus riippuu luonnollisesti niiden alkuarvoista. Seuraavassa on esitetty joitakin havaintoja simulointien perusteella alkuarvojen vaikutuksesta liiman ja taustapaperin loppukosteuteen. Liitteessä 6 on esitetty kuvat, jotka liittyvät alkuarvojen vaikutukseen.

Liiman määrä ja sen sivelykuiva-ainepitoisuus vaikuttavat merkittävästi taustapaperin ja liiman loppukosteuteen. Liimamäärän kasvaessa liima jää luonnollisesti märemmäksi, mikä vaikuttaa myös taustapaperin kosteuteen. Sama vaikutus on myös liiman sivelykuiva-ainepitoisuudella. Mitä kuivempaa liima on sivelyasemalla, sitä kuivempaa se on kuivatuksen jälkeen. Taustapaperin ja liiman väliseen kosteuseroon vaikuttaa liimamäärä, sillä paksu liimakerros kuivuu keskeltä hyvin vähän verrattuna ylä- ja alapintoihin normaalissa laminoitiprosessissa.

Taustapaperin kosteuden lisääntyessä osa kuivattimien tehoista menee paperin kuivaamiseen, jolloin liima jää kostemmaksi. Paperin alkukosteuden yhden prosentin nousu laskee simulointien mukaan liiman ja taustapaperin kosteutta noin yhdellä

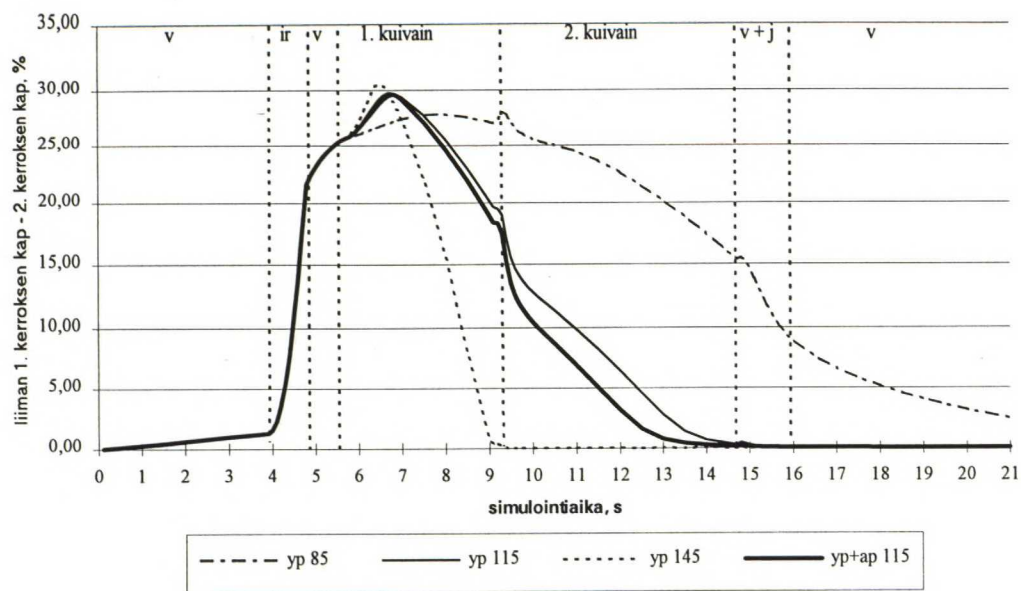


prosentilla. Paperin lämpötilan nousu ei juuri vaikuta taustapaperin loppukosteuteen, mutta laskee liiman loppukosteutta. Paperin lämmöstä johtuen liiman lämpötila nousee nopeammin sille tasolle, missä veden haihtumista alkaa tapahtua.

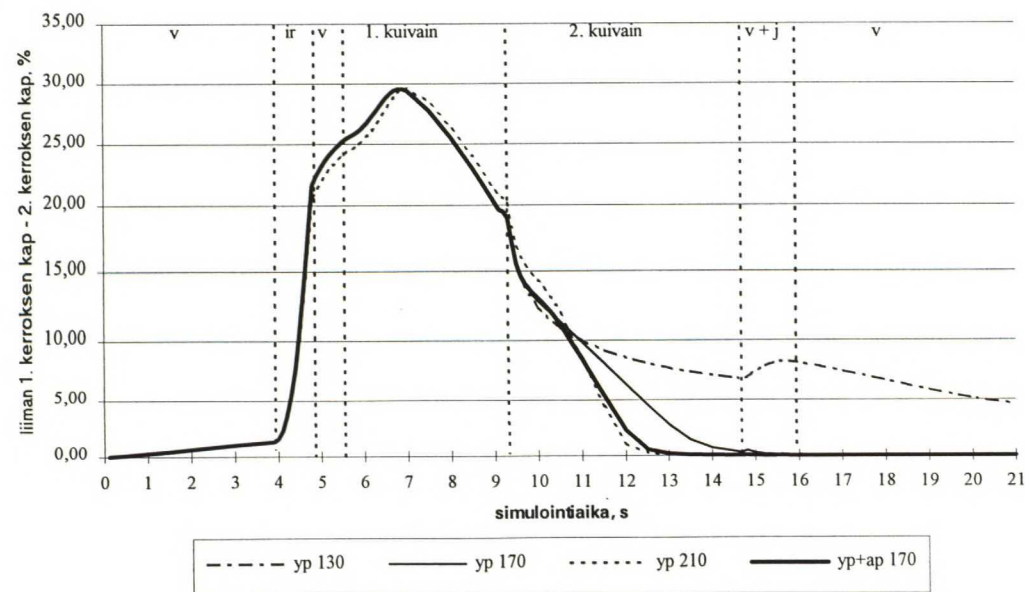
### 12.2.2 Liiman kosteusprofiilit kuivatuksen aikana

Liiman kuivuminen alkaa jo ennen radan saapumista kuivattimille, sillä vettä alkaa imeytyä liimasta taustapaperiin. Rainan saapuessa kuivattimeen sen lämpötila nousee ja rainan saavutettua riittävän korkean lämpötilan vettä alkaa haihtua. Kuivumisen edistyessä vettä alkaa haihtua yhä enemmän avoimelta pinnalta ja imeytyminen taustapaperiin hidastuu. Kuvassa 44 on esitetty esimerkki siitä, miten laminaatin liiman ja paperin kosteus sekä lämpötila muuttuu kuivatusprosessin aikana. Todellisuudessa taustapaperin adsorptio on simuloitua pienempi, koska silikonikerros hidastaa veden imeytymistä. Silikonikerros ei kuitenkaan pysty täysin estämään veden siirtymistä liiman ja paperin välillä.

Seuraavassa tarkastellaan liiman kosteusprofiilia vertaamalla 1. ja 2. liimakerroksen välistä kosteuseroa. Tarkasteluun ei otettu 3. kerrosta, koska sen kosteuteen vaikuttaa simuloinnissa suuresti taustapaperin adsorptio. Kuvista 55 ja 56 nähdään, että suurimmillaan kosteusero kerrosten välillä on 1. kuivaimen alkupuolella. Tällöin liiman 1. kerroksen kuiva-ainepitoisuus on noin 90 %. Liiman kosteuseron tasoittumiseen vaikuttaa 1. kuivaimen lämpötila enemmän kuin 2. kuivaimen lämpötila. Alhaisella 1. kuivaimen lämpötilalla radan lämpötilan nousu hidastuu, jolloin veden siirtyminen keskikerroksesta pintaa kohden myös hidastuu.



Kuva 55. Liiman kosteusprofiilin kehittyminen kuivatuksen aikana erilaisilla 1. kuivaimen puhallusilman lämpötiloilla (yp puhallus yläpuolelta ja yp+ap puhallus molemmilta puolilta). 2. kuivain puhallus yläpuolelta 170 °C.



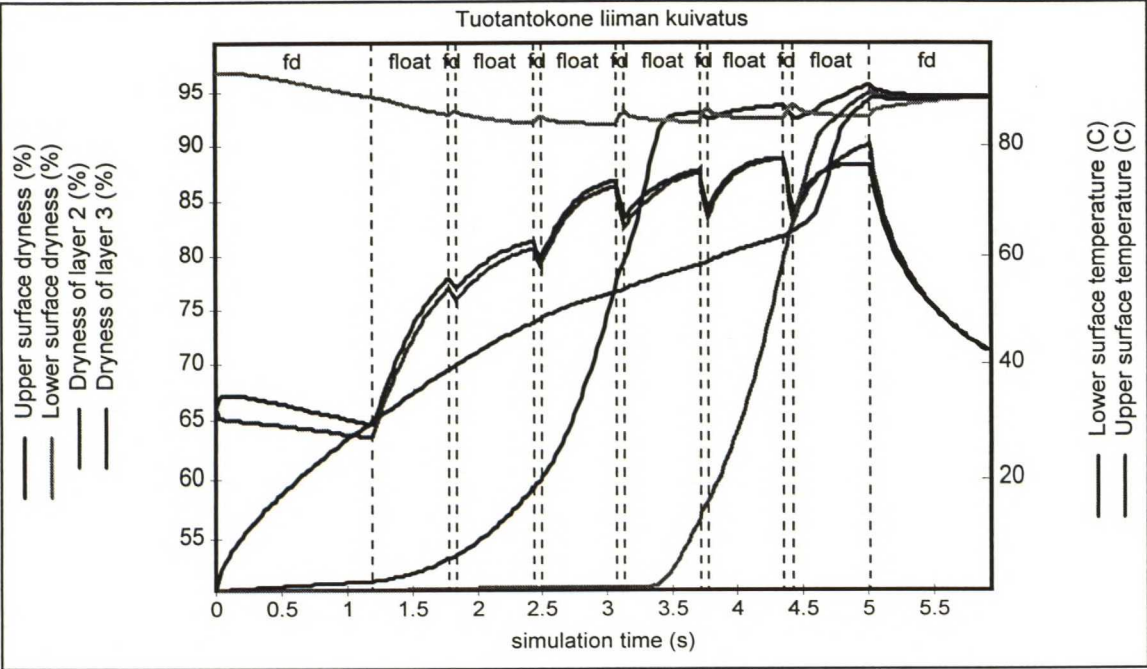
Kuva 56. Liiman kosteusprofiilin kehittyminen kuivatuksen aikana erilaisilla 2. kuivaimen puhallusilman lämpötiloilla (yp puhallus yläpuolelta ja yp+ap puhallus molemmilta puolilta). 1. kuivain puhallus yläpuolelta 115 °C.

Liiman kuivumistapahtumassa näyttää olevan ratkaisevinta alkukuivatus. Rajumpi alkukuivatus tasaa kosteuseron nopeammin kuin miedompi alkukuivatus. Lämpötilan vaikutus on suurempi kosteuseron tasaantumiseen kuin kuivatusilman puhaltamisen myös alapuolelta. Toisen kuivattimen säätöjen vaikutus kosteuseron tasaantumiseen on ensimmäistä pienempi.

### 12.2.3 Tuotantokoneen liiman kuivatus

Tuotantokoneella taustapaperin silikointi ja liiman kuivatus tapahtuvat samassa linjassa. Silikonin verkkouttamisen jälkeen liima sivellään silikonipinnan päälle ja kuivatetaan kuivattimilla. Kuivatuksen jälkeen ennen pinnan laminointia on höyrykostutin, jota ei käytetä tällä hetkellä.

Tuotantokoneessa ei ole IR-kuivattimia, vaan liiman kuivatus tapahtuu kuudella ilmasuutinkuivattimella. Viimeistä eli seitsemättä kuivatinta käytetään jäähdytykseen. Ilmakuivattimilla ei saada tuotua yhtä tehokkaasti lämpöenergiaa rataan kuin IR-kuivattimilla, joten ensimmäisten kuivattimien tehosta osa kuluu radan lämmittämiseen. Kuvassa 57 on esitetty liiman kuivatuksen simulointi tuotantokoneelta. Liiman kosteuspitoisuus on noin 5 %, mikä vastaa mitattua arvoa (3,2 %) hyvin. Taustapaperin kosteus liiman kuivatuksen jälkeen on noin 5 % (mitattu 5,5 %). Mittausten mukaan liima saadaan tuotantokoneella melko kuivaksi, mutta taustapaperi kuivuu hieman liikaa. Tällöin on perusteltua ottaa käyttöön laminointikoneella oleva kostutin.



Kuva 57. Tuotantokoneen liiman kuivatuksen simulointi. Ei kostutusta.

Nopeus 200 m/min.



### 13 TARRALIIMAN KUIVATUSKONSEPTEJA

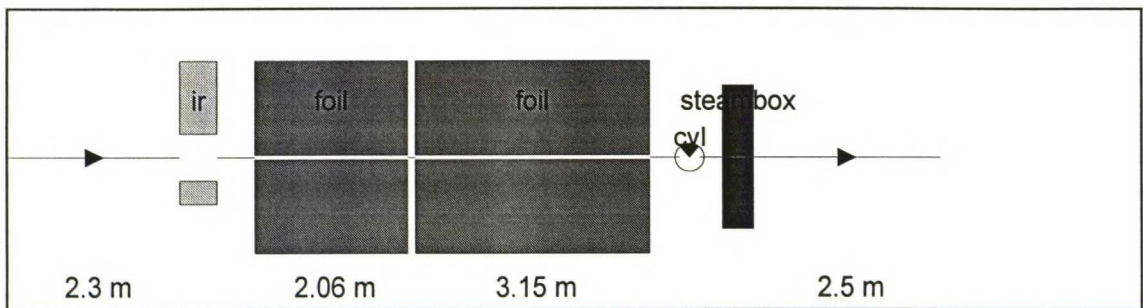
Käyristymisen kannalta laminaatin valmistuksessa tulee pyrkiä saamaan taustapaperin kosteuspitoisuus mahdollisimman lähelle sen tasapainokosteutta käyttöympäristössä.

Liiman kuivatus tulee suorittaa niin, ettei liiman yläpinta kuivu liian nopeasti, jolloin pinta saattaa sulkeutua. Pinnan sulkeutumisesta on seurauksena joko kosteuden jääminen liimaan, jolloin se imeytyy taustapaperiin tai liiman sameutuminen blistering-ilmion seurauksena. Liiman kuivumiseen voidaan vaikuttaa laminointikoneen rakenteella. Valitsemalla oikea kuivatustapa pystytään kuivaamaan liima siten, että siihen ei synny suuria kosteusprofiileja.

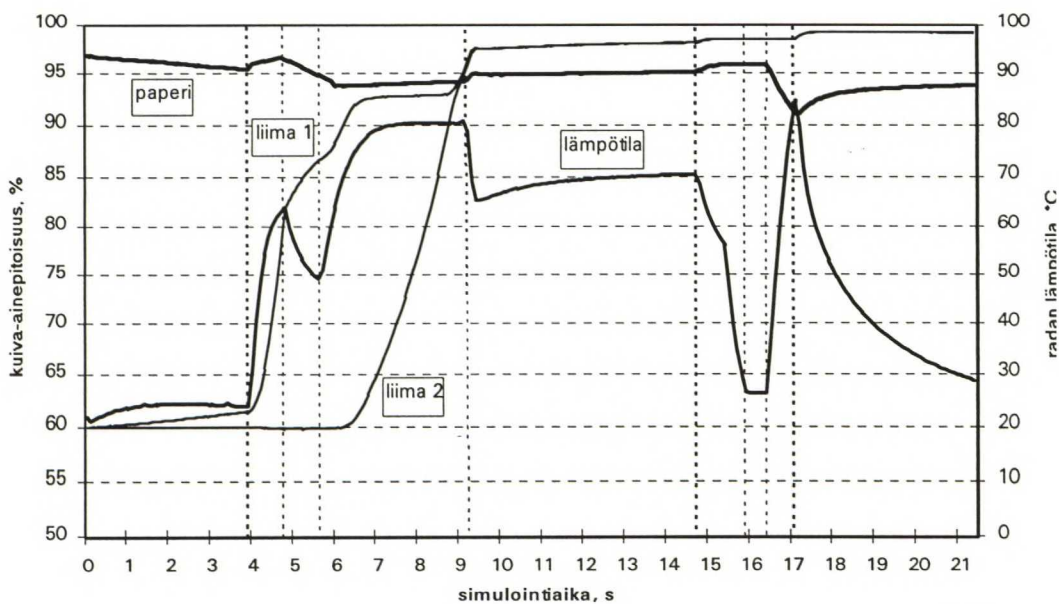
Seuraavassa esitellään kaksi erilaista kuivatustapaa, jolla saadaan liima kuivaksi ja taustapaperiin haluttu kosteus. Simuloinneissa liiman sivelykuiva-ainepitoisuus on 60 %, paperin lähtökuiva-ainepitoisuus 97 % ja laminointikoneen nopeus 35 m/min. Tarraliiman kuivatuksen simuloinnissa virhettä aiheuttaa se, että käytetyssä mallissa ei ole omaa kerrosta silikonille. Tämä aiheuttaa liiman kosteuden todellista suuremman imeytymisen taustapaperiin kuivatuksen alussa. Simuloinnin tuloksissa ei tämän vuoksi esitetä paperia vasten olleen liimakerroksen kosteutta.

#### 13.1 Nykyisen laminointikoneen ajotavan muutos

Ensimmäisessä tapauksessa (kuvat 58-59) käytetään nykyisen koekoneen rakennetta, mutta käytetään poikkeavaa ajotapaa. IR-kuivattimella käytetään suhteellisen pientä tehoa, tällöin vältetään liiman pinnan liiallinen kuivuminen. Käyttämällä ensimmäisessä kuivattimessa korkeata puhallusilman lämpötilaa saadaan liima kuivumaan tehokkaasti ja liiman kahden päällimmäisen kerroksen kosteusero tasaantuu nopeasti. Toisen kuivattimen aikana liima kuivuu vielä hieman. Taustapaperin kostutuksella saadaan paperin kosteus halutulle tasolle.



Kuva 58. Nykyisen laminointikoneen rakenne.

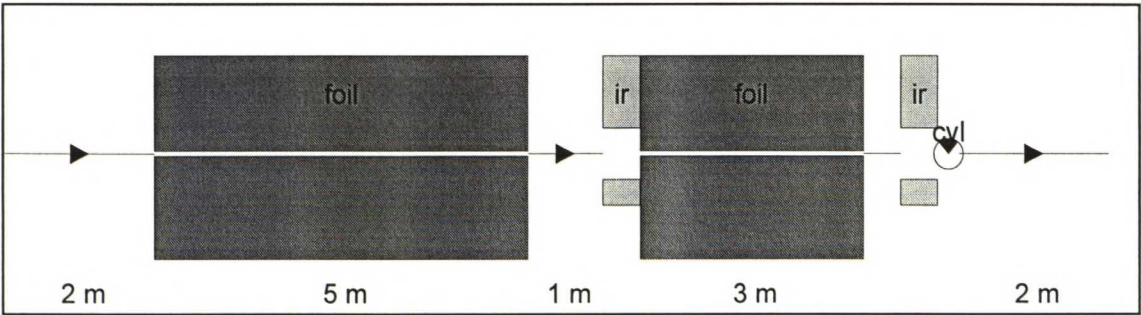


Kuva 59. Laminointiprosessin simulointi (nykyinen kone). Selite paperi on paperin keskimääräinen kap, liima 1 on liiman ylimmäisen kerroksen kap ja liima 2 liiman keskikerroksen kap.

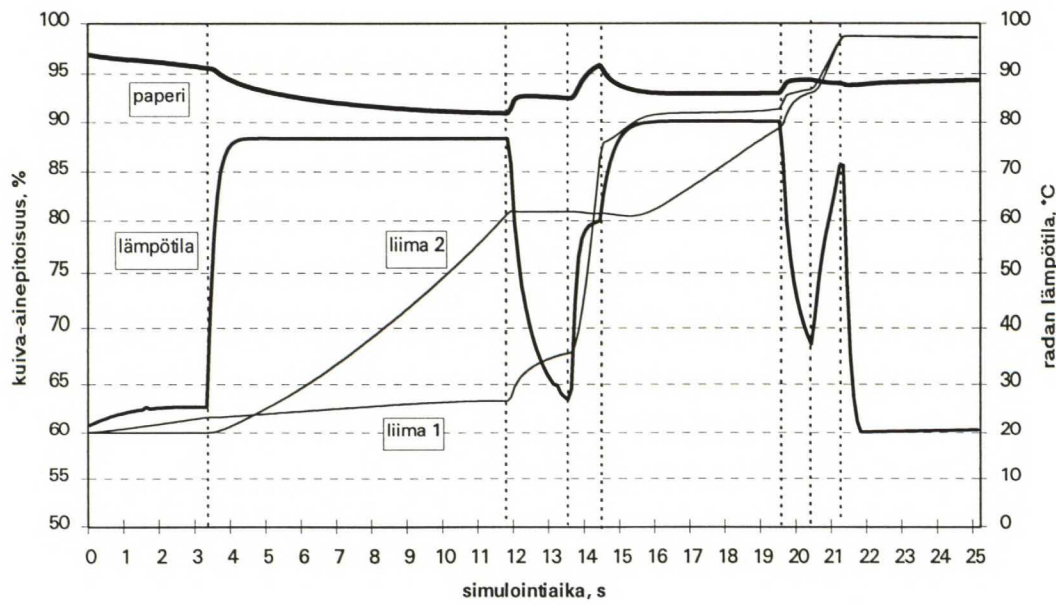
### 13.2 Mahdollinen laminointikoneen konfiguraatio

Toisessa tapauksessa on simuloitu liiman kuivatus uudella koneella, jonka rakenne selviää kuvasta 60. Toisen tapauksen kaltaisella kuivatuskonseptilla saadaan liiman pintakerrokset kuivumaan vieläkin tasaisemmin. Ensimmäisessä kuivattimessa käytetään korkeata puhallusnopeutta, jolloin kuivatusvaikutus välittyy syvemmälle liimaan. Lämpötilan pysyessä suhteellisen alhaisella tasolla ei liiman pintakerros pääse

kuivumaan. Käyttämällä loppukuivatukseen sopivasti valittuja IR- ja ilmakeivattimia saadaan liima ja taustapaperi haluttuun kosteuteen (kuva 61).



Kuva 60. Uudenlaisen laminointikoneen rakenne.



Kuva 61. Laminointiprosessin simulointi (uusi kone). Selite paperi on paperin keskimääräinen kap, liima 1 on liiman ylimmäisen kerroksen kap ja liima 2 liiman keskikerroksen kap.



## 14 YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Muovipintaisen tarralaminaatin kosteuskäyristymä johtuu taustapaperin reagoinnista kosteusvaihteluihin. Käyristymisen suuruus riippuu pääosin paperin kosteuspitoisuudesta ja kosteuslaajenemasta. Käyristymiseen vaikuttaa kuitenkin myös muovietikettimateriaalin ominaisuudet.

Muovipintaisen tarralaminaatin käyristymisen hallitsemiseksi on periaatteessa eri kaksi tapaa. Ensimmäinen on se, että saadaan laminointiprosessin aikana taustapaperiin sama kosteuspitoisuus kuin on sen tasapainokosteuspitoisuus jatkojalostusolosuhteissa. Toinen tapa käyristymisen hallitsemiseksi on vähentää taustapaperin reagointia kosteusvaihteluihin. Jos taustapaperi ei reagoi kosteusvaihteluihin eli sillä on pieni kosteuslaajenema, niin taustapaperin kosteuspitoisuuden vaikutus pienenee.

Laminaatin käyristymisen hallinta taustapaperin kosteuspitoisuuteen vaikuttamalla edellyttää sitä, että jatkojalostus (painatus) tapahtuu vakio-olosuhteissa. Jos ilmankosteuspitoisuus vaihtelee painosalissa, niin on erittäin vaikeata hallita laminaatin käyristymistä. Kosteuspitoisuuden ei tarvitse erota tasapainopitoisuudesta kuin yhden prosentin, jotta muovipintainen tarralaminaatti käyristyy merkittävästi. Taustapaperin kosteuspitoisuus ennen laminointia tulee glassiinipaperilla olla noin 6 % ja päällystetyllä paperilla noin 5 %, jotta normaaleissa paino-olosuhteissa ei kosteutta siirtyisi ilman ja paperin välillä aiheuttaen käyristymistä.

Työn aikana viritettiin Coatman-simulointiohjelma toimimaan nykyiselle koekoneella ja etsittiin simuloimalla sellainen tarraliiman kuivatustapa, jolla taustapaperiin saadaan haluttu kosteus ja liima kuivuu mahdollisimman tasaisesti. Paras vaihtoehto simulointien mukaan on käyttää aluksi suhteellisen rauhallista IR-kuivatusta ja tämän jälkeen kuivata nykyistä tapaa rajummin ensimmäisellä ilmakeivattimella. Korkean lämpötilan käyttö ensimmäisessä kuivattimessa tasaa liiman sisäisen kosteuseron tehokkaasti, mutta ei kuivata tarpeettomasti taustapaperia. Toisella kuivattimella



voidaan suorittaa liiman loppukuivatus. Kuivatuksessa ei kannata puhalttaa kuumaa ilmaa paperin puolelta, koska tällöin paperi kuivuu. Käyttämällä koneella olevaa höyrykostutinta saadaan taustapaperin kosteuspitoisuus halutulle tasolle.

Simuloimalla rakennettiin myös uudenlainen kuivatuskonsepti, jolla voidaan kuivata tarraliima vielä tasaisemmin. Uusi konsepti perustuu siihen, että alkukuivatus suoritetaan ilmakuvattimella suhteellisen alhaisella lämpötilalla ja korkealla puhallusnopeudella. Kun liima on kuivunut tasaisesti tarpeeksi pitkälle, niin voidaan sopivasti valituilla ilma- ja IR-kuivattimilla saada liima ja taustapaperi haluttuun kosteuteen.

Taustapaperin kosteuslaajenema on suoraan yhteydessä laminaatin kosteuskäyritymään. Mitä enemmän paperi laajenee, sitä enemmän laminaatti käyristyy. Kosteuslaajenemaan vaikuttaa paperin kosteustaso ja se mikä on paperin tasapainokosteus missäkin olosuhteessa. Laminointiprosessissa taustapaperin myöhempään kosteuslaajenemaan voidaan vaikuttaa lisäämällä paperin kosteutta ja laukaisemalla mahdollisimman vähän ja z-suunnassa tasaisesti sisäisiä jännityksiä. Jännitysten laukeamista on vaikea estää laminointiprosessin aikana, koska paperi joutuu korkeisiin lämpötiloihin ja kosteuksiin. Yksi keino mittapysyvemmän paperin valmistamiseen suuret kuivatusjännitykset kuitenkin on. Jotta jännitysten laukeaminen ei aiheuttaisi laminaatin käyristymistä heti laminointiprosessin jälkeen, tulisi paperin jännitysten jakaantua tasaisesti z-suunnassa.

Työn aikana määritettiin tarralaminaatin materiaaliominaisuuksia ja viritettiin numeerinen käyristymismalli laminaatille. Simuloimalla kosteuskäyristymistä havaittiin laminaatin käyristymiseen, kosteuslaajeneman lisäksi, vaikuttavan materiaalien paksuudet ja kimmomodulit. Paperin paksuntaminen ja muovin ohentaminen vähentävät simulointien mukaan selvästi laminaatin käyristymistä. Muovin kimmomodulin pienentäminen ja paperin kimmomodulin nostaminen vähentävät käyristymistä, mutta niiden vaikutus on selvästi pienempi verrattaessa kosteuslaajenemaan ja paksuuksiin.

Eri taustapapereilla on erilainen mittapysyvyys. Samoin eri etikettimateriaaleilla on erilaiset ominaisuudet. Tämän vuoksi olisi syytä selvittää, miten eri materiaaleista valmistetut laminaatit reagoivat kosteusmuutoksiin. Niillä materiaaleilla, joilla reagointi on suurta, pitää taustapaperin kosteus saada mahdollisimman lähelle ihannearvoa.

Kosteuslaajeneman pienentämiseksi tulee suorittaa yhteistyötä taustapaperia valmistavan paperitehtaan kanssa. Kosteuslaajenemiseen vaikuttavista tekijöistä voisi testata ainakin kuituorientaation, kuivatuksen ja kalanteroinnin merkityksen. Paperin jännitykset vaikuttavat kosteuslaajenemiseen. Paperin höyrykostutuksessa paperista häviää jännityksiä. Tämän vaikutusta voi testata seuraavasti: ilmastoidaan sekä höyrykostutettua että kostuttamatonta paperia tiettyyn kosteuteen, jonka jälkeen laminoidaan ja mitataan käyristyminen viettäessä uuteen kosteusympäristöön.

Työn aikana edelleen kehitetyt menetelmät, numeerinen käyristymismalli ja prosessisimulointi, ovat yhdessä tehokas työkalu tarralaminaatin käyristymisen hallintaan. Tarralaminaatille viritetyn käyristymismallin avulla voidaan simuloida, miten esimerkiksi taustapaperin ominaisuuksien muuttaminen vaikuttaa laminaatin käyristymiseen. Tämän jälkeen on mahdollista valmistaa pienimmän käyristymän antavaa paperia. Prosessisimuloinnin avulla voidaan helposti tutkia, miten erilaiset kuivatustavat vaikuttavat liiman ja taustapaperin loppukosteuksiin. Simulointimalleja voidaan soveltaa yhdessä tuotantokoneille, jotta voidaan käyttää oikeanlaista kuivatustapaa erilaisen käyristymistaipumuksen omaaville tarralaminaateille.

## LÄHDELUETTELO

1. Lamminmäki, T., Semialkaanisen massan soveltuvuus glassiinityyppisen tarran taustapaperin raaka-aineeksi. Pohjapaperin luonnehtiminen ja kehittäminen. Lisensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1992. 161 s.
2. Manner, H., Erikoispaperinjalostustekniikka. Espoo 1994. Teknillinen korkeakoulu, opetusmonisteet 1994.
3. Hall, I.H., Labels and Labelling. Southampton 1994. Pira International. 68 s.
4. Farrand, J.C. & Ferguson, V.R., Requirements for base paper for coating with silicone. Pulp & Paper 51(1977)8, s. 102-105.
5. Ebeling, K. & Laine, A., Effect of pulp properties and sheet structure on the dimensional stability of release paper. STFI Progress in paper physics. Stockholm, Sweden, June 25-29, 1984. Swedish Forest Products Research Laboratory, Stockholm 1984. s. 33-47.
6. Fairley, M., Advances in release liner technology offer high performance economics. Labels & Labelling 10(1988)3, s. 26-28.
7. Laine, A., Irrokepaperin mittapysyvyyteen vaikuttavat tekijät ja mittapysyvyyden ennustaminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan laitos, Espoo 1984, 82 s.
8. Jones, J.D. & Peters, Y.A., Silicone release coatings. Handbook of pressure sensitive adhesive technology, 2. painos. Toim. D. Satas. Julk. Van Nostrand Reinhold. New York, USA, 1989, s. 601-626.



9. Oittinen, P., Graafinen materiaalitekniikka. Espoo 1993. Teknillinen korkeakoulu, opetusmonisteet 1993.
10. Krawiec, R.M., Modifying resins for acrylic polymers. Handbook of pressure sensitive adhesive technology, 2. painos. Toim. D. Satas. Julk. Van Nostrand Reinhold. New York, USA, 1989, s. 567-584.
11. Junnila, J. Tarraliimatyypit, niiden ominaisuudet ja valmistus. Kirjallisuuskatsaus. Tampereen teknillinen korkeakoulu, muovitekniikan laitos, Tampere 1986. 31 s.
12. Satas, D., Release coatings. Handbook of pressure sensitive adhesive technology, 2. painos. Toim. D. Satas. Julk. Van Nostrand Reinhold. New York, USA, 1989, s. 585-600.
13. Fairley, M., New challenges to meet continued label industry growth. Paper Europe 1(1989)11, s. 26-27.
14. Fries, J.A., Pressure sensitive adhesives: recent developments. Polymers, laminations and coating conference. Tappi Press, Atlanta, 1987. s. 141-146.
15. Karjunen, J., Tarralaminaattikoneen päällysteen säätöjen toteutus. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, säätötekniikan osasto, Tampere 1991, 75 s.
16. Turva, M., Tyypillisten tarraliimojen soveltuvuus liuotinvapaalla silikonoinnilla valmistetulle irrokepaperille. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan laitos, Espoo 1988, 106 s.
17. Satas, D., Coating equipment. Handbook of pressure sensitive adhesive technology, 2. painos. Toim. D. Satas. Julk. Van Nostrand Reinhold. New York, USA, 1989, s. 767-808.



18. Pierson, D.G, McConnell, E.J. & Huminski, F.M., Optimizing the coating of pressure sensitive adhesives. Polymers, laminations and coating conference. Chicago, GA, 29 Aug.- 2 Sept., 1993. Tappi Press, Atlanta, 1993. s. 137-144.
19. Satas, D., Drying. Handbook of pressure sensitive adhesive technology, 2. painos. Toim. D. Satas. Julk. Van Nostrand Reinhold. New York, USA, 1989, s. 831-875.
20. Ruthland, D.F., Dimensional stability and curl. Pulp and paper manufacture, vol. 9. Toim. M. Kouris. Julk. TAPPI/CCPA. Canada 1992, s. 132-151.
21. Htun, M., Hansson, T. & Fellers, C., Torkningens inverkan på papperets mekaniska egenskaper. Stockholm 1987. STFI Meddelande D 281. 59 s.
22. Rytö, N., Paperin perusteet, 9. painos. Otatieto 1991, 169 s.
23. Eklund, D., Dimensional stability of paper from different types of pulp. Paperi ja Puu 51(1969)2, s. 153-161.
24. Nanri, Y. & Uesaka, T., Dimensional stability of mechanical pulps - drying shrinkage and hygroexpansivity. Tappi Journal 76(1993)6, s. 62-66.
25. Viitaharju, P., Käyristymisen hallinta. Kuitu- ja paperifysiikan soveltaminen. Vantaa 24.-25.5.1994. INSKO, Helsinki 1994, s. 1-20.
26. Salmen, L., Boman, R., Fellers, F. & Htun, M., The implications of fiber and sheet structure for the hygroexpansivity of paper. Nordic pulp and paper research journal 2(1987)4, s. 127-131.
27. Ebeling, K., Jauhatuksen vaikutus puukuituihin. Paperin valmistus, 2. painos. Toim. A. Arjas. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983, s. 67-99.

28. Aaltonen, P., Paperirainan tiivistyminen. Paperin valmistus, 2. painos. Toim. A. Arjas. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983, s. 151-168.
29. Johansson, F., Kubát, J. & Patturanie, C., Internal stresses, dimensional stability and deformation of paper. Svensk papperstidning 70(1967)10, s.333-337.
30. Viitaharju, P.H. & Niskanen, K.J., Dried-in shrinkage profiles of paper webs. Tappi Journal 76(1993)8, s.129-134.
31. Pakarinen, P., Kuituorientaatio ja ansiotropia. Kuitu- ja paperifysiikan soveltaminen. Vantaa 24.-25.5.1994. INSKO, Helsinki 1994, s. 1-23.
32. Niskanen, K.J., Anisotropia of laser paper. Paperi ja Puu 75(1993)5, s. 321-328
33. Nordman, L., Levlin, J-E. & Visti, J. Kuivatuksen vaikutus paperirainan ominaisuuksiin. Paperin valmistus, 2. painos. Toim. A. Arjas. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983, s. 705-724.
34. Salmen, L., Fellers, F. & Htun, M., The development and release of dried-in stresses in of paper. Nordic pulp and paper research journal 2(1987)2, s. 44-48.
35. Uesaka, T., Dimensional stability of paper: upgrading paper performance in end use. Journal of Pulp and paper science 17(1991)2, s. J39-J46.
36. Castellan, A., Doignie, J-E. & Pommier, J-E., Effect of differential drying temperature programmes on some mechanical properties of unbleached kraft paper. Svensk Papperstidning 88(1985)6, s. R44-R47.
37. Viitaharju, P., Puupitoisen päällystämättömän painopaperin käyristyminen. Lisensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan laitos, Espoo 1994, 127 s.

38. Green, C.J., Curl, expansivity and dimensional stability. Handbook of physical and mechanical testing of paper and paperboard, vol. 2. Ed. R.E. Mark. New York, 1984, s. 415-443.
39. Eskelinen, V., Paperin kostutus jalostuskoneella ja kostutuksen merkitys lopputuotteen kannalta, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1982. 168 s.
40. Anon., Why paper curls. Paper Europe 1(1989)3, s. 48.
41. Niskanen, K., Kuituorientaatio ja sisäiset jännitykset. Teknillinen korkeakoulu, Puu-21.118 Kuitu- ja paperifysiikka, osa VIII, luentoaineisto syksyllä 1990. Espoo 1990. 28 s.
42. Siirola, P., Sanomalehti- ja luettelopaperin käyristyminen ja siihen vaikuttavat tekijät. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan laitos, Espoo 1993, 108 s.
43. Paulapuro, H., Paperinvalmistusprosessin vaikutus paperin rakenteeseen. Teknillinen korkeakoulu, Puu-21.118 Kuitu- ja paperifysiikka, osa V, luentoaineisto syksyllä 1990. Espoo 1990. 47 s.
44. Gray, D.G., Chirality and curl of paper sheets. Journal of Pulp and Paper Science 15(1989)3, s. J105-J109.
45. Szikla, Z. & Paulapuro, H., Z-directional distribution of fines and filler material in the paper web under wet pressing conditions. Paperi ja Puu 68(1986)9, 654-664.
46. Aaltonen, P., v. Pfaler, J. & Ryti, R., Rainanmuodostus. Paperin valmistus, 2. painos. Toim. A. Arjas. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983, s. 551-606.

47. Mann, K.C., Curl control: a new and unique approach. 1992 Pan-Pacific Pulp & Paper Technology Conference. Tokyo, September 8-10, 1992. Japan Tappi, Japan 1992. s. 207-214.
48. Waterhouse, J., Stera, S. & Brennan, D., Z-direction variation of internal stress and properties in paper. Journal of Pulp and Paper Science 13(1987)1, s. J133-J135.
49. Glynn, P., Jones, H.W.H. & Gallay, W., Drying stresses and curl in paper. Pulp and Paper Magazine of Canada 62(1961)1, s. T39-T48.
50. Waech, T.G., Newsprint curl induced by offset printing. 1992 International printing & graphic arts conference. Pittsburgh, October 18-21, 1992. TAPPI Press, Atlanta, 1992. s. 335-340.
51. Ryymin, R., VTT Energia. Julkaisematon seloste. 1994
52. Rogove, A.H., Release liners. A review of present technology. Polymers, Laminations & Coating Conference 1991. Tappi Press, Atlanta, 1991, s. 919-929.
53. Tuomisto, M.V., Supercalendering in Europe and North America: getting closer, but differences still exist. Tappi Journal 72(1989)1, s. 68-76.
54. Korpivaara, M., Onnistuneita investointeja laatuun. Paperi ja Puu 69(1987)10, s. 798- 801.
55. Andersson, J.G., Using paper temperature to prevent curl. Tappi Journal 74(1991)6, s. 131-135.



56. Kajanto, I., Paperin ja paperituotteiden rakennemallit mekaanisten ominaisuuksien simuloinnissa. Kuitu- ja paperifysiikan soveltaminen. Vantaa 24.-25.5.1994. INSKO, Helsinki 1994, s. 1-20.
57. Kajanto, I., Paperin kupruilun analysointi teoreettisesti elementtimenetelmällä. PCS Communications 41. Espoo 1992.
58. Rajala, P., Simulering av torkning av bestruket papper. Diplomarbete. Åbo Akademi, Kemisk-tekniska fakulteten, Åbo 1992, 55 s.
59. Roisum, D.R., Moisture effects on webs and rolls. Tappi Journal 76(1993)6, s. 129-137.
60. Eagleton, D.G. & Marcondes, J.A., Moisture-sorption isotherms for paper-based components of transport packaging for fresh produce. Tappi Journal 77(1994)7, s.75-81.
61. Ebeling, K., Puukuidun vesisorptio ja turpoaminen. Paperin valmistus, 2. painos. Toim. A. Arjas. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983, s. 47-66.
62. Lampinen, M.J. & Ojala, K.T., Mathematical modelling of web drying. Advances in Transport Processes IX. Toim. A.S. Mujumdar & R.A. Malshelkar. Elsevier 1993, s. 1-77.
63. Arvela, P., Paperin sorptio-ominaisuudet. Paperin valmistus, 2. painos. Toim. A. Arjas. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983, s. 253-270.
64. Lehtinen, E., Kosketuskulmien ja pintaenergian mittausta paperista. Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan laitos, Espoo 1992, 177 s.

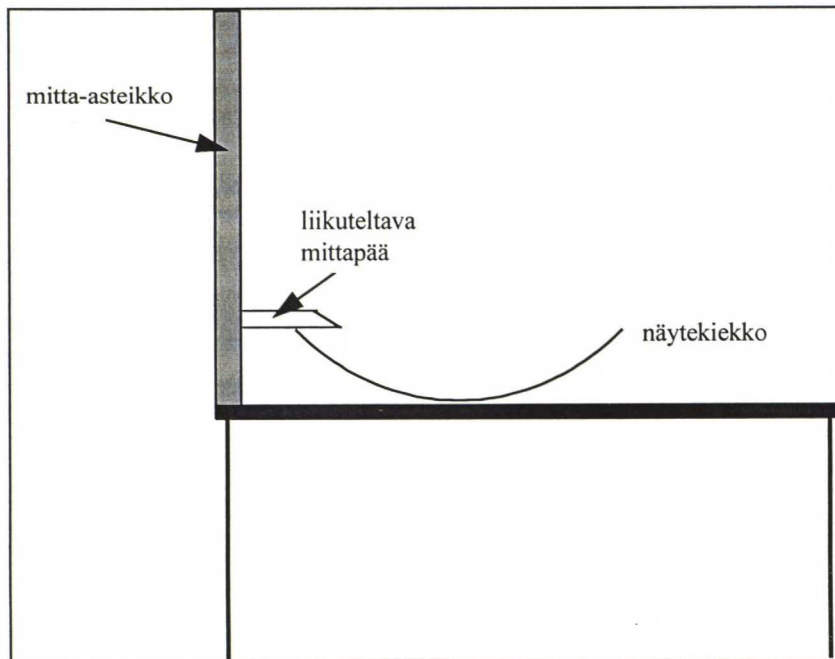
65. Wilhelmsson, B., An experimental and theretical study of multi-cylinder paper drying. Doctoral dissertation. Lund University, Lund 1995, 172 s.
66. Heikkilä, P., A study of the drying process of pigment coated paper webs. Academic dissertation. Åbo Akademi, Dept. of chemical engineering, Turku 1992, 143 s.
67. Rajala, P. & Karlsson, M., A drying model for coated paper, for improved printing properties. VTT Energia. Jyväskylä 1995.
68. Karlsson, M., Soininen, M.A., Paltakari, J.T. & Paulapuro, H., A simulation model for board and paper machine dryer section. Heat and Mass Transfer in Pulp and Paper Processing. ASME 1993. s. 9-16.
69. Soininen, M., Massan kuivatus. Puumassan valmistus, 2. painos. Toim. N-E. Virkola. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983, s. 929-999.

## KÄYRISTYMISEN MITTAUS

Taustapapereiden ja laminaattien käyristymisen mitattaamista varten arkeista leikattiin pyöreitä näytteitä, joiden halkaisija oli 90 mm.

Käyristymistä kuvattiin reunanouseman avulla. Reunanousema ilmoittaa, kuinka paljon näytteen reuna nousee tasosta. Näytteellä, jonka halkaisija on 90 mm, reunanousema millimetreissä on sama kuin käyristymissäteen käänteisluku  $K$  (1/m). Esimerkiksi käyryyden arvo  $K = 15$  1/m tarkoittaa, että näytekiekon reunat poikkeavat kiekon keskitasosta 15 mm.

Mittaus suoritettiin VTT Energiassa kehitetyn yksinkertaisen mittalaitteen avulla (kuva 1). Näytteistä mitattiin käyryydet ennen ja jälkeen käsittelyn.



Kuva 1. Käyryyden mittaamisessa käytetty laitteisto

Taustapapereille määritettiin sekä kosteuskäyristymät että uunikäyristymät. Laminaateista mitattiin ainoastaan kosteuskäyristymät.

Kosteuskäyrityksen mittauksessa näytteet asetettiin ilmastointihuoneeseen (lämpötila noin 23 °C, ilman suhteellinen kosteus noin 50 %) vaakasuoraan asentoon. Ennen varsinaisia käyryysmittauksia jokaisesta koepisteestä määritettiin käyrityssuunta testiarkilla. Varsinaiset käyritysnäytteet asetettiin siten, että ne käyrityivät kovera puoli ylöspäin.

Näytteiden annettiin ilmastoitua huoneessa, jolloin papereiden kosteusprofiili tasaantui, jonka jälkeen niiden käyryys mitattiin. Osa käyritysmittauksista suoritettiin välittömästi näytteiden ilmastointihuoneeseen viennin jälkeen. Näissä mittauksissa paperin kosteusprofiili ei ehtinyt tasaantua, vaan ainoastaan paperin pintakosteus muuttui.

Uunikäyrityksen mittausta varten näytteet asetettiin uuniin ( $t = 140\text{ °C}$ ) kahdeksikymmeneksi minuutiksi, jonka jälkeen niiden käyryys mitattiin.

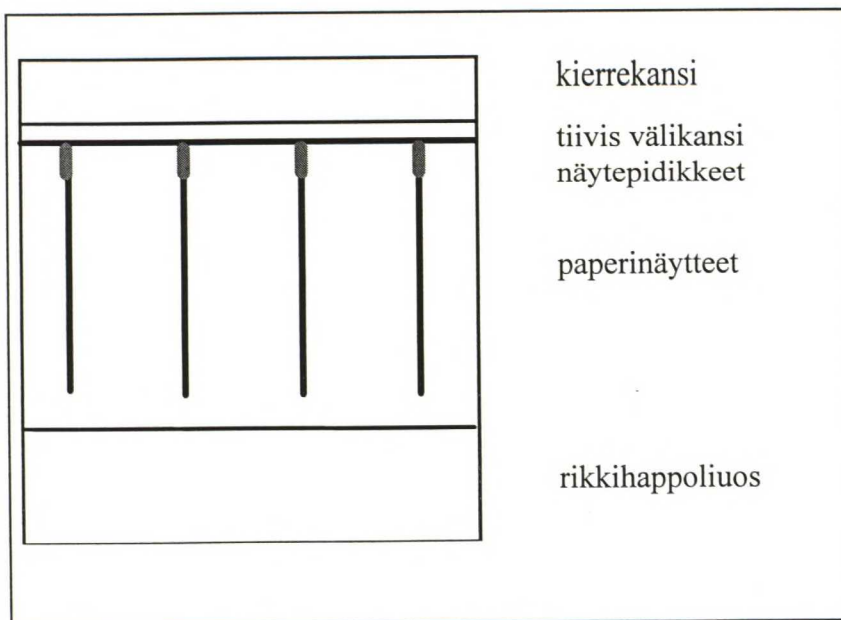
Käyryysmittauksien tuloksissa positiiviset arvot ovat kohti taustapaperin silikonoitavaa pintaa. Tuloksissa ilmoitetut arvot kuvaavat poikkisuuntaista käyritystä.



## KOSTEUSISOTERMIEN MÄÄRITYS

Työssä määritettiin kosteusisotermit erilaisille tarran taustapapereille kolmessa eri lämpötilassa (nimellisesti 25 °C, 50 °C ja 75 °C). Mittaustulosten perusteella määritettiin kirjallisuudessa esitettyyn kosteusisotermiä kuvaavaan yhtälöön paperille sopivat parametrit. Kosteusisotermien avulla voidaan määrittää taustapaperin oikea kosteuspitoisuus kussakin käyttöympäristössä.

Mittauksissa purkin pohjalle laitettiin rikkihappoliuosta, joka antoi purkissa olevalle ilmalle halutun suhteellisen kosteuden. Purkin annettiin olla yhden vuorokauden mittauslämpötilassa ennen näytteiden asettamista. Purkkiin asetettiin riippumaan neljä paperinäytettä. Näytteiden annettiin olla purkeissa noin kaksi viikkoa, jolloin arkkien kosteuspitoisuuden ja ympäröivän ilman välille syntyi tasapainotila. Tasapainotilan asettumista seurattiin erillisestä testipurkista. Myös testipurkissa oli neljä paperinäytettä, jotka poistettiin välillä purkista ja niiden massa punnittiin. Punituksen jälkeen paperit asetettiin välittömästi takaisin testipurkkiin. Kun testipurkissa olleiden näytteiden massa ei enää mittausten välillä merkittävästi muuttunut, katsottiin tasapainotila saavutetuksi.



Kuva 1. Kosteusisotermien määrittämisessä käytetty mittauslaitteisto.

Mittaukset suoritettiin järjestyksessä 50 °C, 75 °C ja 25 °C. Lämpötiloissa 50 °C ja 75 °C suoritettavaa mittausta varten näytepurkit asetettiin lämpökaappiin. Lämpötilassa 25 °C purkit olivat varastohuoneen hyllyillä. Lämpötila pysyi hyvin nimellisissä lämpötilassa koko mittausajan (todelliset ympäröivän ilman lämpötilat olivat 23,0 ± 2,0 °C, 49,5 ± 0,5 °C ja 73,5±1,5°C).

Mittauksia varten valmistettiin seitsemän eri painoprosenttista rikkihappoliuosta. Taulukossa 1 on esitetty käytetyt rikkihappoliuokset ja ilman suhteelliset kosteudet eri lämpötiloissa. Rikkihappoliuosta ei vaihdettu mittausten välillä, vaan purkeihin vaihdettiin vain uudet näytteet uutta lämpötilaa varten.

Taulukko 1. Kosteusisotermimittauksissa käytetyt rikkihappoliuokset ja ilman suhteelliset kosteudet lämpötiloissa 25 °C, 50 °C ja 75 °C.

p-% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ilman suhteellinen kosteus, %		
	25 °C	50 °C	75 °C
80	0,5	0,8	1,2
72	3,6	4,6	5,8
68	6,8	8,2	9,7
59	18,6	20,7	22,6
44	48,3	50,2	51,5
31	74,0	75,7	75,3
17	89,9	90,6	90,0

Näytepaperi punnittiin, kun näytteen kosteuspitoisuus oli saavuttanut tasapainotilan purkin ilman kanssa. Punnituksen jälkeen näyte kuivattiin lämpökaapissa (103 ± 2 °C) arkin kosteuspitoisuuden määrittämiseksi. Neljän näytepaperin kosteuspitoisuuden keskiarvo ja purkin ilman suhteellinen kosteus muodostivat kosteusisotermiin yhden pisteen.

Mitattujen kosteuisotermien pisteiden avulla etsittiin kertoimet kirjallisuudessa esitettyyn yhtälöön

$$\Phi = 1 - e^{-(s_1 + s_2 \times t)} z^{(s_3 + s_4 \times t)} \quad (1)$$

missä

$\Phi$  ilman suhteellinen kosteus, %

$z$  paperin kosteuspitoisuus, kg H<sub>2</sub>O / kg ka

$t$  lämpötila, °C

$s_1, s_2, s_3, s_4$  materiaalista riippuvat vakiokertoimet

Mittauspisteiden sovituksessa yhtälöön 1 käytettiin Systat 5.0 -ohjelmaa.

## LAMINAATTIEN MATERIAALIOMINAISUUDET

näyte	neliömassa, g/m <sup>2</sup>		paksuus, um		kimmomoduli, MPa			
	ka	95 % luott.	ka	95 % luott.	konesuunta		poikkisuunta	
					ka	95 % luott.	ka	95 % luott.
A1	66,1	0,2	56,3	0,3	11349,0	155,7	5856,1	83,9
A2	66,8	0,2	56,8	0,5	11819,8	186,0	5749,6	90,2
A3	67,1	0,3	56,5	0,6	11628,5	169,2	5805,6	109,0
B1	60,6	0,2	57,8	0,8	11021,5	142,0	5394,8	71,6
B2	59,8	0,2	57,2	0,9	11618,2	134,1	5905,7	45,5
B3	61,5	0,5	57,0	0,7	11360,4	169,3	5816,9	61,9
C1	92,6	0,5	85,6	0,9	7813,3	71,0	3702,8	30,9
C2	92,1	0,3	86,2	1,1	7931,4	110,4	3439,3	56,1
C3	93,4	0,4	85,6	0,7	7806,3	104,3	3651,0	22,1
D1	61,4	0,6	52,4	0,7	9564,1	128,4	5920,1	119,0
D2	60,6	0,7	53,2	0,7	9708,6	145,8	5761,4	96,8
D3	62,2	0,3	52,4	0,9	10084,1	108,0	5783,2	78,8
E1	134,4	1,2	148,4	0,7	5576,7	90,2	3400,6	45,7
E2	135,5	0,5	149,1	0,6	5416,6	74,6	3252,2	21,0
E3	135,6	0,2	147,7	0,6	5377,8	80,6	3249,1	45,0
PP	50,9	1,5	58,7	0,4	3037,0	63,9	2813,6	56,4
PE15	98,6	0,5	105,6	0,6	498,7	11,6	624,4	6,9
PE25	97,2	0,7	106,3	0,5	495,4	4,5	565,6	3,2

näyte	kosteus, %		kosteuslaajenema, %			
	ka	95 % luott.	konesuunta		poikkisuunta	
			ka	95 % luott.	ka	95 % luott.
A1	5,7	0,1	0,057	0,009	0,285	0,009
A2	5,0	0,1	0,034	0,013	0,373	0,014
A3	4,9	0,2	0,025	0,006	0,393	0,002
B1	5,4	0,2	0,068	0,018	0,265	0,003
B2	4,3	0,4	0,009	0,006	0,304	0,007
B3	4,5	0,3	0,009	0,008	0,317	0,030
C1	5,1	0,2	0,093	0,021	0,288	0,001
C2	4,5	0,2	0,039	0,017	0,334	0,014
C3	4,8	0,2	0,038	0,009	0,345	0,011
D1	6,1	0,2	0,138	0,060	0,385	0,017
D2	5,5	0,1	0,065	0,056	0,480	0,017
D3	5,5	0,1	0,082	0,020	0,466	0,020
E1	4,3	0,1	0,023	0,030	0,185	0,034
E2	4,3	0,1	0,061	0,055	0,205	0,022
E3	4,3	0,1	0,067	0,032	0,214	0,038



KÄYRISTYMISSMITTAUKSET

näyte  paperi	taustapaperien käyritymät, mm					
	valm.jälk. käyryys		kosteuskäyritymä 45 % RH		uunikäyritymä	
	ka	95 % luott.	ka	95 % luott.	ka	95 % luott.
A1	10,5	3,2	0,2	0,8	15,1	3,1
A2	9,4	1,7	4,8	1,1	18,6	2,3
A3	13,4	1,9	4,4	1,0	15,9	1,1
B1	6,0	2,0	0,2	0,8	11,3	3,8
B2	3,4	0,9	5,1	0,5	13,7	2,9
B3	5,8	1,4	5,5	1,1	21,0	3,3
C1	0,9	0,9	8,9	0,4	-6,4	1,5
C2	4,6	1,5	13,9	0,6	-2,3	1,0
C3	4,4	1,1	13,7	0,6	-3,6	1,9
D1	4,4	1,2	-3,0	0,3	13,3	3,5
D2	6,3	0,9	2,0	0,6	20,9	3,8
D3	8,1	0,8	2,7	0,7	23,4	1,1
E1	-1,9	0,4	2,9	0,1	-6,5	1,3
E2	-1,1	0,2	2,1	0,1	-4,8	1,1
E3	-1,3	0,3	2,3	0,1	-4,5	0,7

tausta	käsintehtyjen laminaattien (PP) kosteuskäyritymä, mm				
	45 % RH		tausta	45 % RH	
	ka	95 % luott.		ka	95 % luott.
A1	14,2	0,8	A2/1	15,4	0,7
A2	14,7	0,8	A2/2	6,4	0,6
B1	13,4	0,5	B2/1	11,9	0,5
B2	14,8	0,9	B2/2	7,5	0,7
C1	14,2	0,8	C2/1	16,1	0,4
C2	16,5	0,9	C2/2	1,0	0,1
D1	15,1	0,6	D2/1	17,0	0,5
D2	18,4	0,7	D2/2	14,1	0,7
E1	1,0	0,2	E2/1	3,2	0,2
E2	1,4	0,2	E2/2	1,0	0,1

1 raakapaperi

2 kuivattu paperi

3 slikonoitu paperi

/1 taustapaperi normaalisti

/2 taustapaperi käännetty

KONEELLA TEHTYJEN LAMINAATTIEN KÄYRISTYMÄT JA KOSTEUDET

ajo	koneella tehtyjen laminaattien (PP) kosteuskäyristymä, mm							
	käyryys 1 (heti)		käyryys 1 (ilmastoitu)		käyryys 2 (heti)		käyryys 2 (ilmastoitu)	
	50 % RH		50 % RH		50 % RH		50 % RH	
	ka	95 % luott.	ka	95 % luott.	ka	95 % luott.	ka	95 % luott.
pilot 1	4,5	0,7	12,1	0,8	5,4	0,5	9,5	0,9
pilot 2	-7,3	1,3	-0,5	0,0	-1,8	0,5	-1,3	0,5
pilot 3	-18,4	3,0	-0,5	0,0	-10,1	1,9	2,2	0,5
pilot 4	-13,8	1,3	1,0	0,1	-6,3	1,3	3,3	0,6
pilot 5	6,7	1,8	9,8	0,6	3,1	0,6	8,3	0,8
pilot 6	-1,7	0,7	-1,0	0,1	-3,9	0,8	-2,5	0,6
tuotanto	6,3	0,4	15,3	0,5	--	--	--	--

koepiste	liiman kosteus tapauksessa				taustapaperin kosteus tapauksessa			
	käyryys 1 (heti)		käyryys 2 (heti)		käyryys 1 (heti)		käyryys 2 (heti)	
	ka	95 % luott.	ka	95 % luott.	ka	95 % luott.	ka	95 % luott.
pilot 1	2,4%	0,2%	2,8%	0,4%	5,7%	0,2%	4,9%	0,2%
pilot 2	2,4%	0,8%	2,8%	0,4%	7,0%	0,2%	6,4%	0,0%
pilot 3	4,4%	0,3%	3,4%	0,3%	9,2%	0,2%	8,3%	0,0%
pilot 4	4,9%	0,2%	2,1%	0,4%	8,0%	1,0%	6,4%	0,1%
pilot 5	5,2%	1,1%	3,1%	0,8%	4,9%	0,7%	4,6%	0,1%
pilot 6	7,0%	0,8%	3,5%	0,0%	5,6%	0,1%	5,3%	0,2%
tuotanto	3,2%	0,5%	--	--	5,5%	0,1%	--	--

KOSTEUSISOTERMIMITTAUKSET

ilman suht.kost.	paperien tasapainokosteuspitoisuus lämpötilassa 25°C, kg H2O/kg ka									
	A1		A2		C1		D1		E1	
	ka	95% luott	ka	95% luott	ka	95% luott	ka	95% luott	ka	95% luott
0,005	0,0037	0,0016	0,0056	0,0021	0,0063	0,0028	0,0065	0,0019	0,0025	0,0009
0,036	0,0113	0,0026	0,0115	0,0041	0,0103	0,0026	0,0132	0,0023	0,0104	0,0020
0,068	0,0181	0,0050	0,0168	0,0020	0,0180	0,0031	0,0219	0,0017	0,0162	0,0023
0,186	0,0362	0,0037	0,0331	0,0009	0,0306	0,0053	0,0365	0,0059	0,0281	0,0022
0,483	0,0581	0,0033	0,0581	0,0012	0,0498	0,0070	0,0643	0,0040	0,0503	0,0005
0,740	0,0896	0,0024	0,0929	0,0020	0,0765	0,0018	0,0947	0,0012	0,0749	0,0014
0,899	0,1592	0,0048	0,1575	0,0049	0,1240	0,0052	0,1566	0,0115	0,1278	0,0048

ilman suht.kost.	paperien tasapainokosteuspitoisuus lämpötilassa 50°C, kg H2O/kg ka									
	A1		B1		C1		D1		E1	
	ka	95 % luott	ka	95% luott	ka	95% luott	ka	95% luott	ka	95% luott
0,008	0,0021	0,0019	0,0032	0,0023	0,0030	0,0011	0,0019	0,0015	0,0014	0,0007
0,046	0,0056	0,0040	0,0078	0,0042	0,0080	0,0006	0,0108	0,0010	0,0083	0,0018
0,082	0,0163	0,0015	0,0167	0,0018	0,0128	0,0013	0,0154	0,0037	0,0095	0,0017
0,207	0,0305	0,0024	0,0299	0,0028	0,0250	0,0019	0,0284	0,0083	0,0238	0,0009
0,502	0,0564	0,0015	0,0505	0,0184	0,0447	0,0021	0,0613	0,0012	0,0436	0,0008
0,757	0,0840	0,0008	0,0811	0,0024	0,0664	0,0037	0,0884	0,0014	0,0686	0,0028
0,906	0,1382	0,0028	0,1348	0,0030	0,1217	0,0051	0,1334	0,0084	0,1068	0,0071

ilman suht.kost.	paperien tasapainokosteuspitoisuus lämpötilassa 75°C, kg H2O/kg ka									
	A1		A2		C1		D1		E1	
	ka	95% luott	ka	95% luott	ka	95% luott	ka	95% luott	ka	95% luott
0,012	0,0049	0,0038	0,0057	0,0019	0,0032	0,0017	0,0068	0,0055	0,0004	0,0004
0,058	0,0089	0,0036	0,0080	0,0009	0,0047	0,0013	0,0089	0,0031	0,0061	0,0011
0,097	0,0115	0,0024	0,0122	0,0030	0,0090	0,0016	0,0148	0,0014	0,0094	0,0025
0,226	0,0255	0,0041	0,0248	0,0022	0,0186	0,0031	0,0243	0,0040	0,0203	0,0021
0,515	0,0487	0,0014	0,0477	0,0031	0,0327	0,0045	0,0529	0,0050	0,0381	0,0050
0,753	0,0705	0,0015	0,0684	0,0026	0,0527	0,0035	0,0758	0,0024	0,0617	0,0037
0,900	0,1058	0,0035	0,1035	0,0068	0,0868	0,0046	0,1111	0,0059	0,0949	0,0078

COATMAN-OHJELMAN VIRITYKSESSÄ KÄYTETYT MITTAUSARVOT

Koeajot pelkällä taustapaperilla

Koekoneen asetukset taustapaperin kostutuksessa

kp	koneen kostutus	koneen	1.kuivain	1.kuivain	2.kuivain	2.kuivain	käytetty paperi
		nopeus m/min	lämpö °C	puh.nop m/s	lämpö °C	puh.nop m/s	
1	pois	30	120	22	128	23	B
2	päällä	30	120	22	128	23	B
3	pois	40	120	23	140	24	B
4	päällä	40	120	23	148	24	B
5	pois	50	120	23	159	23	B
6	päällä	50	120	23	170	23	B
7	pois	60	120	23	175	23	B
8	päällä	60	120	23	177	23	B
9	pois	40	87	25	186	24	B
10	pois	40	105	25	194	24	B
11	pois	30	120	25	143	25	C
12	päällä	30	120	25	140	25	C
13	pois	40	120	25	140	25	C
14	päällä	40	120	25	141	25	C

Mitatut radan lämpötilat ja kosteudet taustapaperin kostutuksessa

kp	lämpötila, °C								kosteus, %	
	auki- rullaus	silikoinnin jälkeen	ennen IR	IR jälkeen	ennen kuivatt.	kuivatti- mien jälk	kostutuk jälkeen	kiinni- rullaus	auki- rullaus	kiinni- rullaus
1	19,5	20,2	21	77	43	56	14	20,5	5,8	2,1
2			21,3	111	52	56	87			3,4
3			22,2	105	59,3	66	47			2,5
4			22,4	106	59	70	85			4,1
5			23	101	62	77	46			3,0
6			22	100	61	78	87			4,2
7			22	96	65	83	43			3,9
8			22	98	64	85	85			4,6
9			22	111	61,4	83	44			1,6
10			22	109	61	82	26			1,8
11	18,5	20,3	21,1	86	57	72	24,4	20,3	2,9	1,0
12			23	91	61	69	98			3,2
13			23	100	65	76	44			1,5
14			23	100	65	76	98			3,2



Koeajot muovipintaisella tarralaminaatilla

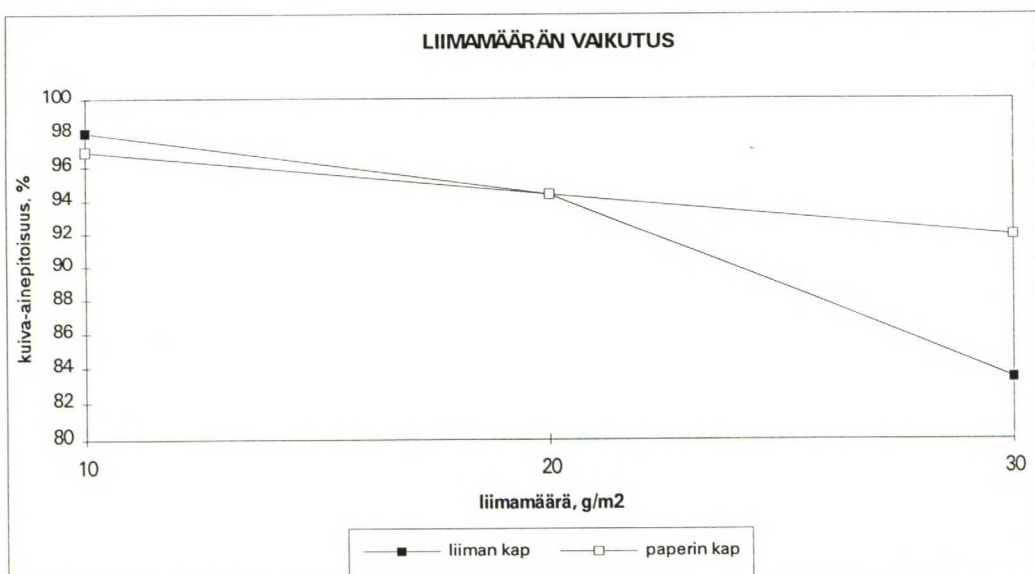
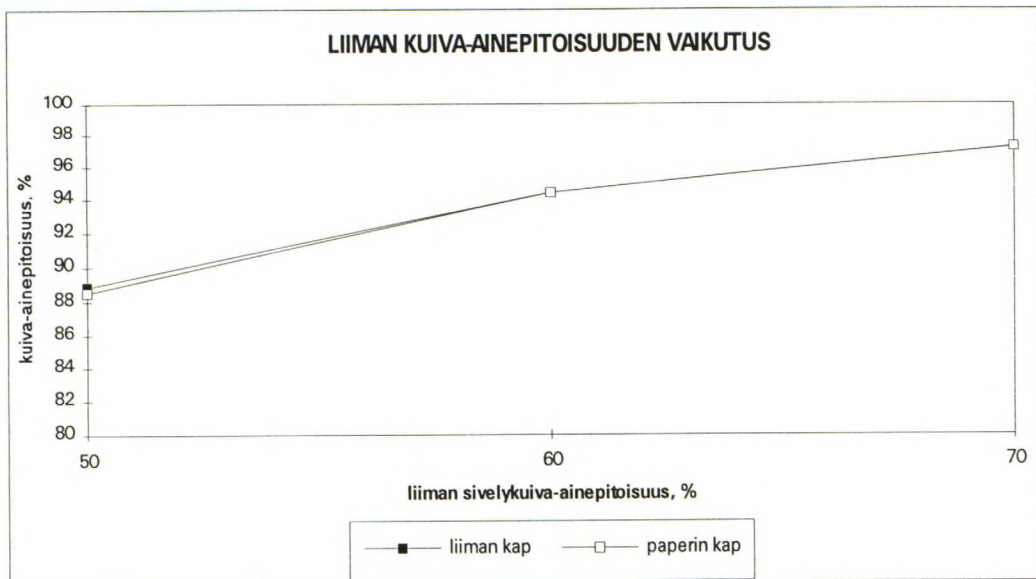
Koekoneen asetukset tarralaminaatin valmistuksessa

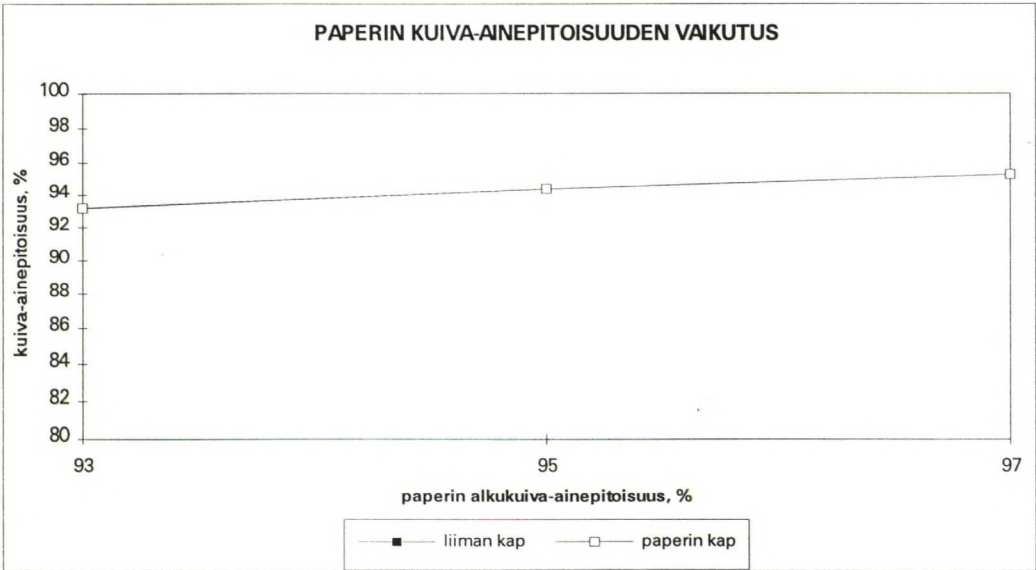
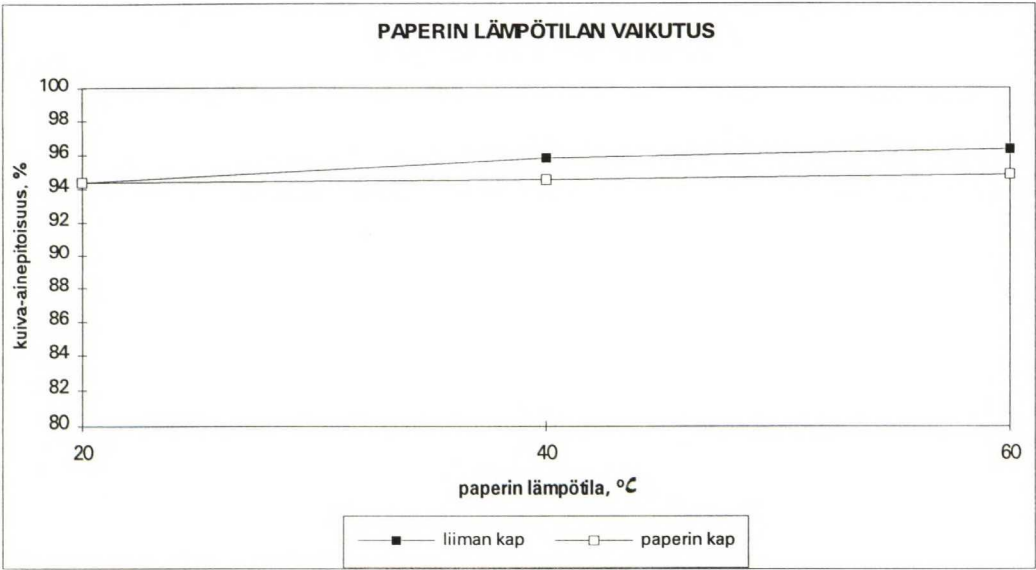
kp	koneen			vakioasetukset kaikilla koepisteillä
	kostutus	nopeus m/min	liimamäärä g/m2	
1	pois	35	19,5	1 IR
2	päällä	35	19,5	1. huuva 115,1 °C
3	päällä	35	33	2. huuva 170-180 °C (säätö 200 °C)
4	pois	35	33	
5	pois	15	19,5	liiman lähtökap n. 60%
6	päällä	15	19,5	taustapaperin lähtökap 94,7 %

Mitatut radan lämpötilat laminaatin valmistuksessa, °C

kp	auki- rullaus	liima-aseman jälkeen	IR jälkee	ennen kuivatt.	kuivatti- mien jälk	ennen kostut.	kostutuk. jälkeen	kiinni- rullaus
1	22	18,5	62	58	65	28	22	21
2			66	56	65	26	81	
3			57	53	57	27	87	
4			56	53	56	32	40	
5			75	62	62	22	45	
6			75	61	62	21	90	

LIIMAN JA PAPERIN ALKUARVOJEN VAIKUTUS LOPPUKOSTEUKSIIN  
SIMULOINTIEN MUKAAN.





PUP - 95

~~TEKNILLINEN KORKEAKOULU~~  
~~Puunjalostustekninen laitos~~  
~~Kirjasto~~

PUP